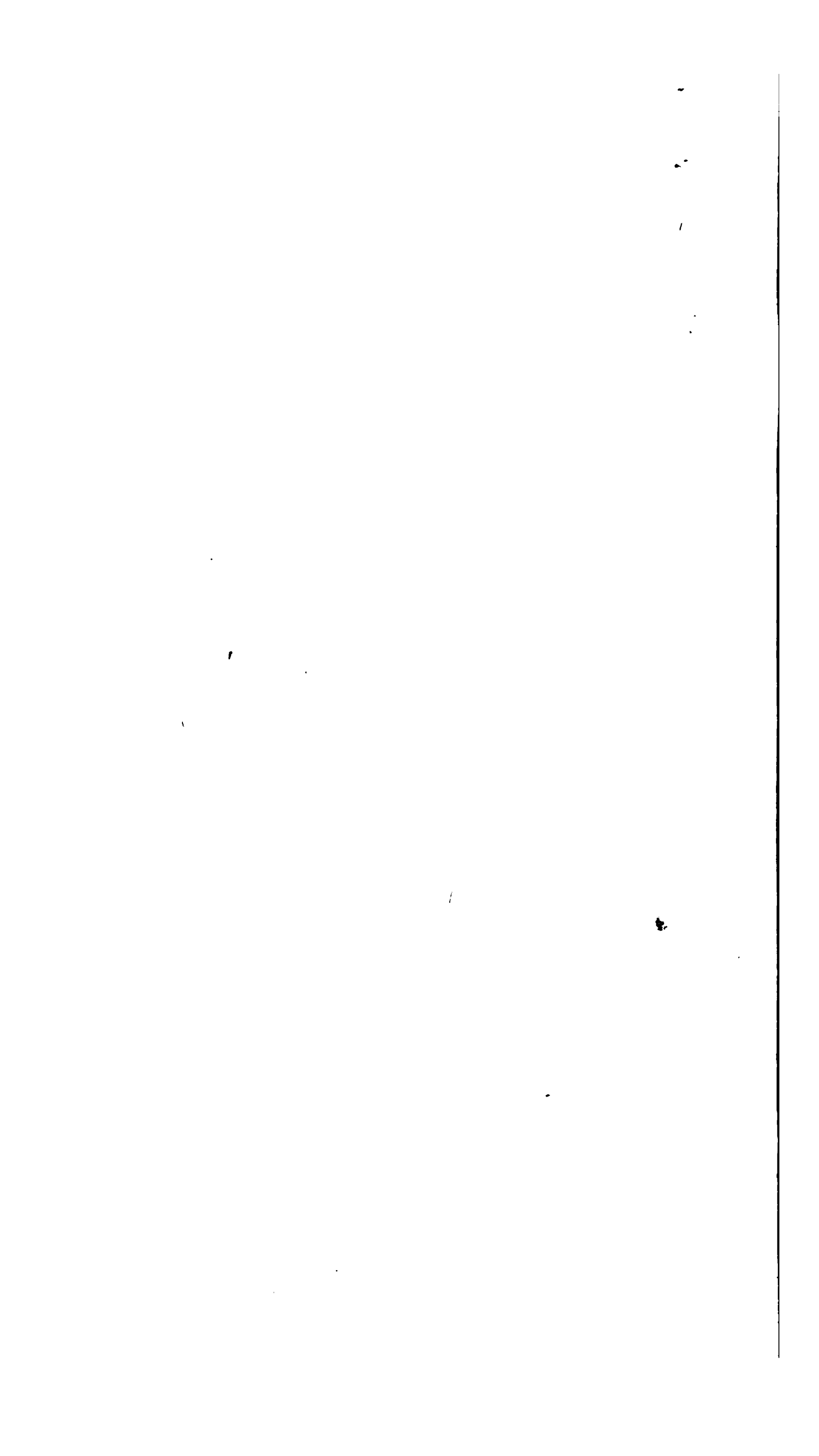
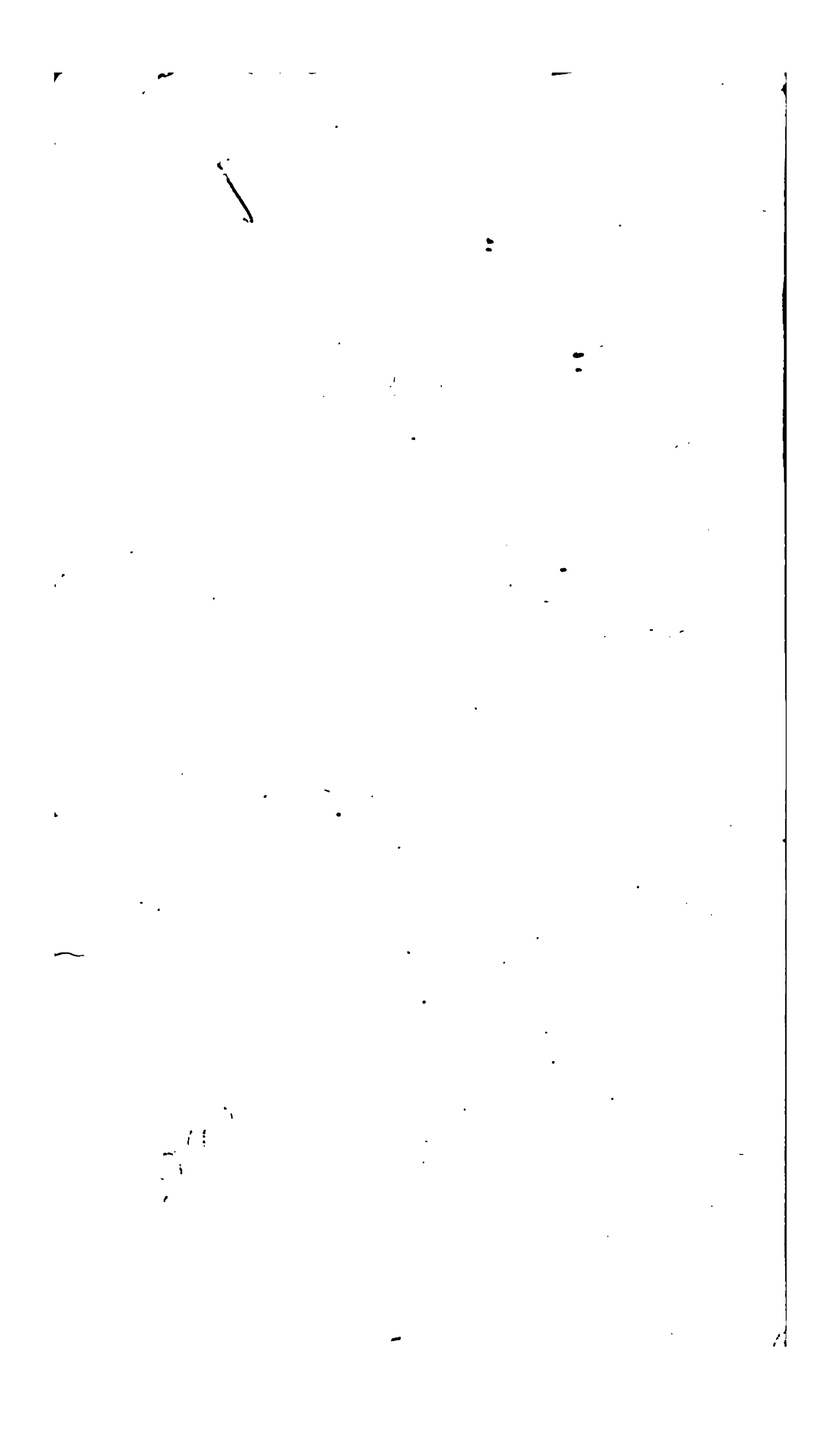

721



INTERNATIONALE

WISSENSCHAFTLICHE BIBLIOTHEK.

XII. BAND.



# DIE FÜNF SINNE DES MENSCHEN.



VON

JULIUS BERNSTEIN,

O. Ö. PROFESSOR DER PHYSIOLOGIE AN DER UNIVERSITÄT ZU HALLE.

MIT 91 ABBILDUNGEN IN HOLZSCHNITT.

Der Mensch muss bei dem Glauben verharren, dass das Unbegreifliche begreiflich sei; er würde sonst nicht forschen.

*Goethe.*



LEIPZIG:
F. A. BROCKHAUS.

1875.

SEINEM VATER

DEM

SCHRIFTSTELLER A. BERNSTEIN

IN

KINDLICHER LIEBE UND DANKBARKEIT

GEWIDMET

VOM

VERFASSER.

# VORWORT.

Das vorliegende Buch macht weder einen Anspruch auf systematische Vollständigkeit, noch auf eine im weitesten Sinne des Wortes verstandene Popularität. Im allgemeinen ist freilich darin ein System innegehalten, wie es sich in Vorlesungen und Lehrbüchern im Laufe der Zeit herausgebildet hat; aber dasselbe ist mannichfach durchbrochen von allgemeinen physikalischen und physiologischen Erläuterungen, welche das Verständniss fördern sollen, und hat daher zum Zwecke der populären Schreibweise viele Abänderungen erleiden müssen. Insofern darf der Autor seine Arbeit den populären Bestrebungen zurechnen; trotzdem hat er es versucht, den Leser zuweilen einen Schritt weiter über denjenigen Kreis hinauszuführen, welcher für gewöhnlich das Gebiet der populären Betrachtung einschliesst, und wenn es ihm nicht gelungen sein sollte, den Weg bis dahin hinreichend zu ebnen, so möge der geneigte Leser einige Nachsicht üben.

Zur Erleichterung des Verständnisses sind dem Texte Figuren beigegeben, die zum Theil besonders entworfen,

zum grössern Theile wissenschaftlichen Specialwerken entlehnt und mehrfach zu vorliegendem Zwecke abgeändert worden sind. Hierzu dienten: J. Müller, Atlas der Physik (Leipzig 1871), aus welchem die meisten physikalischen Abbildungen entnommen sind; Kölliker, Handbuch der Gewebelehre des Menschen (Leipzig 1867); Stricker, Handbuch der Lehre von den Geweben (Leipzig 1871); Helmholtz, Handbuch der physiologischen Optik (Leipzig 1867); Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen (Braunschweig 1872). Auf die genannten Werke mögen daher diejenigen Leser verwiesen sein, welche den Wunsch haben, in das behandelte Gebiet der Wissenschaft tiefer einzudringen.

Halle a. S., im April 1875.

Der Verfasser.

# INHALT.

Seite

### Drittes Kapitel.



### Viertes Kapitel.



### Fünftes Kapitel.



### Sechstes Kapitel.



### Siebentes Kapitel.



### Achtes Kapitel.



### Neuntes Kapitel.



## DRITTER ABSCHNITT.

## *Der Gehörssinn.*

### Erstes Kapitel.

Seite

## Zweites Kapitel.



## Drittes Kapitel.



## Viertes Kapitel.



## Fünftes Kapitel.



## Sechstes Kapitel.



## Siebentes Kapitel.



## Achtes Kapitel.

---

# Einleitung.

In der Thierwelt haben sich eine Anzahl von Organen entwickelt, welche die Fähigkeit besitzen, den einzelnen Organismen von den Vorgängen in der Aussenwelt Kenntniss zu verschaffen und welche „Sinnesorgane“ genannt werden. In höchster Vollendung erscheinen sie im Menschen ausgebildet, dessen Seelenthätigkeit in demselben Masse vor der der übrigen Organismen vorausgeeilt ist.

Alle Sinnesorgane stehen in einem anatomisch nachweisbaren Zusammenhange mit dem Nervensystem und zwar durch Nervenstränge und Nervenfäden. Fühlen, Sehen, Hören, Riechen und Schmecken ist ohne das Vorhandensein eines Nervensystems nicht denkbar, selbst wenn die Sinnesorgane noch so vollkommen ausgebildet wären. Ein Auge, dessen Sehnerv zerstört ist, kann uns kein Bild der Aussenwelt mehr vorführen, ein Ohr, dessen Hörnerv zerrissen ist, leitet uns keinen Ton mehr zu, ein Arm, dessen Nerv verletzt ist, ist ganz ohne Gefühl. Ein solches Auge kann wie ein gesundes aussehen, es kann die Lichtstrahlen in sich aufnehmen und ein Bild der Gegenstände auf seinem Hintergrunde entstehen lassen, und doch kommt dieses nicht zur Empfindung, weil die Verbindung mit dem Gehirn, der Centralstation des Nervensystems, fehlt. Aehnlich verhält es sich mit dem tauben Ohre, dem empfindungs-

losen Arme. Die Sinnesorgane sind also nur Werkzeuge der Seele, welche im Gehirn ihren Sitz hat und vermittels der Nerven sich dieser Werkzeuge bedient, um von den Dingen Kenntniss zu erlangen. In den Sinnesorganen erzeugen die Kräfte, welche in der Aussenwelt thätig sind, das Licht, die Wärme, der Schall, die Bewegung, die chemische Verwandtschaft, eine Reizung der dort befindlichen Sinnesnerven, und diese leiten die empfangene Reizung durch ihre ganze Länge dem Gehirn zu. Jedes Sinnesorgan besitzt daher einen specifischen Reiz, durch welchen es in Erregung versetzt wird. Die Nervenenden des Sehnerven im Auge können nur durch Lichtwellen gereizt werden, nicht aber durch Schallwellen, die Enden des Hörnerven im Ohre werden durch letztere gereizt. Für die Gefühlsnerven der Haut ist der mechanische Druck und die Wärme ein specifischer Reiz, auf die Endigungen der Geschmacks- und Geruchsnerven üben einige chemische Substanzen einen bestimmten Reiz aus.

Die eigentliche Sinnesempfindung kann offenbar erst im Gehirn zu Stande kommen. Die Lichtempfindung findet nicht im Auge selbst statt, sondern hier geschieht nur ein Lichteindruck auf den sich ausbreitenden Sehnerven; die Lichtempfindung kann aber auch nicht im Sehnerven stattfinden, denn dieser thut nichts weiter, als dass er den Zustand der Reizung vom Auge nach dem Gehirn hin fortpflanzt. Vielmehr beginnt erst im Gehirn, erregt durch den gereizten Sehnerven, ein uns über alle Massen räthselhafter Process, die Lichtempfindung, und da man den Sehnerven bis zu seinem Ursprunge im Gehirn verfolgen kann, so nimmt man an, dass dieser Process in dem Sehnervencentrum vor sich gehe.

Das Auge ist also nichts weiter als ein optisches Werkzeug, welches das Licht auffängt, der Sehnerv ist nichts weiter als ein Leitungsapparat, welcher die Nachricht einer Reizung zum Gehirn befördert. Man hat bei Operationen die Beobachtung gemacht, dass wenn

der Sehnerv entweder gezerrt, gequetscht oder gar durchschnitten wird, von dem Operirten im Momente der Verletzung ein starker Lichtblitz empfunden wird. Dieses Licht hat nicht in der Wirklichkeit seinen Ursprung, da es nur von den operirten Personen empfunden wird. Seine Empfindung entsteht nur dadurch, dass der Sehnerv mechanisch gereizt wird und dass diese Reizung, bis zum Sehnervencentrum fortgepflanzt, hier den Process der Lichtempfindung hervorruft, gleichsam als wäre die Reizung vom Auge ausgegangen. Die Lichtempfindung kommt in solchem Falle ganz ohne äusseres objectives Licht zu Stande und entsteht immer, wenn der Sehnerv auf irgendeine Weise gereizt wird, durch solche Einflüsse, welche auch auf andere Nerven erregend einwirken, durch Elektricität, durch Wärme, durch chemische Mittel. Hierbei spielt niemals objectives Licht, d. h. die Lichtwellen des Aethers, irgendwelche Rolle; und daraus entnehmen wir den unumstösslichen Beweis dafür, dass sich beim gewöhnlichen Sehen durch den Sehnerven nicht etwa irgendeine Spur des ins Auge einfallenden Lichts zum Gehirn hin fortpflanze, sondern nur ein dem Nerven eigenthümlicher Process der Erregung, welcher auch ebenso gut, wie im Auge durch Licht, in seinem Stamme durch Druck, Elektricität, Wärme und chemische Mittel hervorgerufen werden kann. Gleichgültig welcher von diesen Reizen eingewirkt hat, der Process im Sehnerven ist immer derselbe, die Wirkung auf das Sehnervencentrum immer die Auslösung einer Lichtempfindung. Ganz ebenso muss es sich mit den übrigen Sinnesorganen und ihren Nerven verhalten. Ein Schall wird nur bis an die Enden des Hörnerven geleitet und nicht etwa durch den Hörnerven zu dem Gehirn hin fortgepflanzt. Der in seinen Enden gereizte Nerv leitet seinen Zustand dem Gehirn zu und erzeugt dort im Hörnervencentrum die *Gehörsempfindung*.

Eine Gehörsempfindung kann deshalb auch vorkommen, ohne dass eine Schallwelle ins Ohr gelangt, sobald

der Hörnerv auf irgendeine Weise gereizt wird, sei es durch Druck, Zerrung, durch Elektricität u. s. w. Immer entsteht hierdurch in dem Nerven der erregte Zustand, welcher im Hörnervencentrum die Gehörsempfindung auslöst.

Es ist klar, dass wir diese Vorstellungen auch auf die übrigen Sinnesorgane des Geschmacks, Geruchs und Gefühls ausdehnen müssen. Alle Sinnesnerven haben nur die Aufgabe, von ihren Endorganen aus den Sinnesorganen, nach ihren Centren im Gehirn, den Sinnescentren, den Zustand der Nervenerregung zu leiten. Diese Nervenerregung ist nichts, was dem erstern Reize ähnlich wäre. Sie ist weder Licht, noch Schall, noch ist sie Druck oder Wärme, weder die Strömung einer schmeckbaren Flüssigkeit, noch die eines riechbaren Gases. Sie ist vielmehr ein Process eigener Art, von welchem man mit Grund annimmt, dass er in allen Nerven des Körpers einer und derselbe sei, weil er uns überall, in den Muskelnerven wie den Empfindungsnerven, dieselben Erscheinungen zeigt und denselben Gesetzen unterliegt.

Doch ebenso wenig wie der Nerv die Spur des Reizes an sich trägt, besitzt er eine Spur von Empfindung. Haben wir einen Empfindungsnerven an einer Stelle durchschnitten, so können wir das abgetrennte Stück noch so stark reizen, es bleibt jede Empfindung aus. Der centrale Stumpf aber ist überall empfindlich.

Der Empfindungsvorgang kann also nur in den Centren stattfinden, nirgendwo sonst. Der erregte Zustand eines Sinnescentrums ist derjenige materielle Vorgang, welcher einer Sinnesempfindung entspricht; und es ist sogar nicht nothwendig, dass der betreffende Sinnesnerv diese Erregung veranlasst hat, denn im Traume haben wir deutliche Sinnesempfindungen, welche, ohne dass die specifischen Sinnesreize auf die Nerven einwirken, nur dadurch entstehen, dass die Sinnescentren durch innere Reize erregt werden. Auch abnorme, krankhafte Reize, wie sie bei Gehirnerkrankungen vorkommen, abnorme

Beschaffenheit des Blutes in fieberhaften Krankheiten rufen solche subjective Sinneswahrnehmungen hervor, welche man Phantasmen und Hallucinationen nennt.

Aus diesen Erörterungen wird es klar, dass wir eigentlich nicht die Dinge der Aussenwelt an sich empfinden, sondern immer nur diejenigen Veränderungen, welche in den Sinnescentren vor sich gehen.

Wie kommt es denn aber, dass wir trotzdem die innern Empfindungen in die Aussenwelt hinaus verlegen, dass wir alles Gesehene, alles was wir hören und fühlen, nach aussen hin versetzen? — Diese Thatsache, welche von vornherein dem gesunden Menschenverstande so einfach und natürlich erscheint, bedarf einer Betrachtung.

Die vorgelegte Frage lässt sich kurz dahin beantworten, dass wir von der Geburt an durch Erfahrung lernen, unsere Sinnesempfindungen zu deuten, und dass wir durch tausendfältige Experimente, welche wir im gewöhnlichen Leben mit Auge, Ohr und Gliedmassen vornehmen, zu der Einsicht kommen, dass der Gegenstand unserer Empfindung, d. h. ihre Endursache, sich ausser uns befindet. Das neugeborene Kind hat sicherlich Sinnesempfindungen. Das Licht, welches in das Auge einfällt, wirkt unstreitig auf das Gehirn ein, denn die Pupille zieht sich unter dem Lichteinfluss zusammen, ein Vorgang, der ohne Betheiligung des Sehnervencentrums im Gehirn nicht zu Stande kommen kann. Aber die Empfindung ist nur eine innerliche, etwa wie das Gefühl der Sättigung oder des Hungers; sie wird sicherlich noch nicht nach aussen hin verlegt. Zwar beobachtet man, dass ein Kind allmählich anfängt, durch Bewegungen des Auges und des Kopfes die Gegenstände zu fixiren, d. h. das Auge in eine solche Lage zu bringen, dass das Bild des Gegenstandes auf die Stelle des deutlichsten Sehens im Centrum der Netzhaut fällt. Doch braucht in dieser Zeit der Entwickelung eine Verlegung des Gesehenen nach aussen noch nicht angenommen zu werden. Das Fixiren ge-

schieht auch nicht plötzlich, es entwickelt sich allmählich aus einem unsteten Triebe zur Bewegung der Augen, der vielleicht durch den Lichtreiz erzeugt wird, und wenn hierbei zufällig die Stelle des deutlichen Sehens auf einen Gegenstand fällt, welcher durch Helligkeit, Farbe oder Bewegung die Aufmerksamkeit erregt, so wird durch Wiederholung dieses Vorgangs das Kind allmählich durch Erfahrung lernen, die zweckmässige Bewegung willkürlich auszuführen.

Zugleich aber gehen mit den Uebungen im Sehen die Uebungen des Tastsinnes einher. Auch die Tastempfindungen werden anfänglich nicht auf die Gegenstände nach aussen hin bezogen, sondern vielleicht nur als innere Gefühle und Hemmungen der Bewegung empfunden. Nun gehört zu den ersten Gegenständen, die zugleich gesehen werden, die Hand, das wichtigste Tastorgan, und da diese die Fähigkeit hat, viele Bewegungen im Raume auszuführen, so wird das Auge sehr bald die sich bewegende und tastende Hand sehen, und so werden in der Wahrnehmung viele dabei stattfindenden Empfindungen der Zeit nach zusammenfallen. Während die Hand einen Gegenstand berührt, sieht das Auge nicht nur diesen, sondern auch die Hand selbst, während die Hand eine Bewegung macht, wird zu gleicher Zeit das innere Gefühl der Muskelbewegung, die entstehende Tastempfindung, und mit dem Auge die sichtbare Bewegung der Hand und auch des Gegenstandes wahrgenommen.

Diese Gleichzeitigkeit der Tastempfindung und der Gesichtsempfindung ist es, welche allmählich zu dem Eindruck führt, dass der durch beide Sinne wahrgenommene Gegenstand sich in der Aussenwelt befindet. Freilich gehört zu diesem Schritte der Erkenntniss ein logischer Schluss, dessen Entstehung uns ein Räthsel des Seelenlebens bleibt, der aber unbewusst ausgeführt wird und gewiss nur allmählich sich herausbildet. Er besteht darin, dass wenn die zwei Empfindungen, die Tast- und Gesichtsempfindung, immer gleichzeitig ein-

treten, sie auch eine und dieselbe Ursache haben müssen, dass also der gesehene und der getastete Gegenstand einer und derselbe sein müsse.

Doch ein solcher logischer Schluss genügt noch nicht, um zur Verlegung der Dinge nach aussen zu gelangen. Es folgt ein zweiter, der freilich sehr wissenschaftlich erscheinen mag, aber es nicht ist, weil er unbewusst ausgeführt wird.

Die beiden gleichzeitig stattfindenden Tast- und Gesichtsempfindungen sind zwei Empfindungen ungleichartiger Qualität, die in zwei verschiedenen Sinnescentren des Gehirns vor sich gehen. Befände sich nun die Ursache der Empfindungen im Innern der percipirenden Organe, so müsste sie gleichzeitig in denen des Gesichts- und des Tastsinnes vorhanden sein und zwar in beiden von ungleichartiger Beschaffenheit. Das heisst, sie müsste eine doppelte sein. Sie ist aber nach dem ersten logischen Schlusse eine einfache, keine doppelte, also ist sie nicht innen, sondern sie muss aussen sein.

Das Zusammenwirken des Tast- und Sehsinnes ist in der That für die menschliche Seele eine bedeutende Quelle der Erkenntniss im Bereiche der Aussenwelt. Doch soll damit nicht behauptet sein, dass der Tastsinn allein ohne Mithülfe des Auges, wie bei Blindgeborenen, nicht auch zu einer Erkenntniss führen könne. Es wäre sogar denkbar, dass der Tastsinn allein vor dem Sehen und Fixiren zu einer Unterscheidung des eigenen Körpers und der Aussenwelt führt. Denn das Betasten des eigenen Körpers mit der Hand ruft immer eine doppelte Tastempfindung hervor, eine durch die Hand, die andere durch die berührte Hautstelle, das Betasten eines fremden Gegenstandes erzeugt immer nur eine einzige Tastempfindung durch das Tastorgan. Auf dieser physiologischen Basis kann sich die Vorstellung von der Aussenwelt aufbauen, obgleich es schwer hält, diesen Act der Seele in einfache logische Schlüsse zu zergliedern.

Genug, wenn einmal die Vorstellung sich heraus gebildet hat, dass der getastete Gegenstand der Aussenwelt angehört, so wird die Erziehung des Gesichtssinnes schnell vor sich gehen. Das gleichzeitige Zusammentreffen einer Tastempfindung und Gesichtsempfindung, die gleichzeitig mit dem Auge wahrgenommene und mit der tastenden Hand gefühlte Bewegung, das Eintreten der Tastempfindung, sobald das Auge die Berührung des Gegenstandes mit der Hand sieht, dies alles führt zu der Ueberzeugung, dass die Ursache der beiden Empfindungen ein und dieselbe sein muss, und dass, wenn die Tastempfindung nach aussen projicirt wird, dies auch mit der Gesichtsempfindung geschehen muss.

Wir müssen die Sinnesempfindungen von andern Empfindungen unterscheiden, deren der Körper fähig ist, und die man mit dem Namen Allgemeingefühle bezeichnet hat. Dazu gehört vorzüglich die Schmerzempfindung, welche fast über den ganzen Körper verbreitet ist. Der charakteristische Unterschied zwischen diesen Allgemeingefühlen und den Sinnesempfindungen besteht darin, dass wir durch die Sinnesempfindung Kenntniss von den Vorgängen und Objecten der Aussenwelt erhalten, und dass wir die Empfindung, welche sie erzeugen, in die Objecte der Aussenwelt selbst hineinverlegen, während wir durch die Allgemeingefühle nur Zustände unsers eigenen Körpers empfinden.

Die Grenze zwischen Tastempfindung und Schmerzempfindung lässt sich durch folgendes von Ernst Heinrich Weber gegebene Beispiel gut erläutern. Setzen wir die Schneide eines scharfen Messers auf die Haut auf, so fühlen wir mit Hülfe unsers Tastsinnes die Schneide, wir haben eine Sinnesempfindung und verlegen diese in das Object, welches die Ursache der Empfindung ist. Sobald wir aber mit dem Messer in die Haut einschneiden, so entsteht Schmerzempfindung, eine Empfindung, die wir nicht mehr in das schneidende Messer hineinverlegen, sondern die wir in uns selbst fühlen und die uns nur von einem veränderten

Zustande unsers eigenen Körpers Mittheilung macht. Durch die Schmerzempfindung sind wir nicht im Stande, das Object selbst, welches sie hervorgerufen, und seine Beschaffenheit zu erkennen.

Die Sinnesempfindung erscheint daher als eine höhere vollkommenere Art von Empfindung gegenüber den Allgemeingefühlen. Es ist zwar das allgemeine Empfindungsvermögen des Körpers der gemeinsame Boden, auf welchem auch die Sinnesempfindung erwächst, aber es hebt aus diesem sich die Sinnesempfindung zu einer grössern Vollendung empor, indem sie an der Peripherie des Körpers vermöge sehr fein construirter Organe durch Kräfte der Aussenwelt angeregt wird und dadurch die Seele in unmittelbare Beziehung zur Aussenwelt setzt.

---

# ERSTER ABSCHNITT.

## Der Gefühlssinn.

---

### Erstes Kapitel.

Die Qualitäten des Gefühlssinnes. — Der Tastsinn und die Tastorgane. — Der Ortssinn der Haut.

Wir wissen aus Erfahrung, dass jeder Punkt unserer Haut eine gewisse Empfindlichkeit besitzt, und dass gewisse Theile derselben mehr oder weniger empfindlich sind. Diese Eigenschaft wird der Haut durch eine grosse Zahl von Nerven ertheilt, welche aus dem Gehirn und Rückenmark entspringen und sich baumförmig im Körper ausbreiten. Nur diese Nerven allein sind im Stande einem Körpertheile Empfindlichkeit zu verleihen, denn sobald ein solcher Nerv verletzt oder erkrankt ist, so wird derjenige Körpertheil, den er versorgt, dadurch gefühllos.

Die Haut ist also als ein den ganzen Körper einschliessendes Sinnesorgan zu betrachten, welches dazu bestimmt ist, jeden Punkt unserer Körperoberfläche gegen Eindrücke von aussen her empfänglich zu machen, und zwar gegen Eindrücke mannichfacher Art, welche eigenthümliche Sinnesthätigkeiten in uns anregen und zugleich mit geistigen Processen in einem unzertrennbaren Zusammenhange stehen. Es ist ganz merkwürdig

zu verfolgen, wie verschiedenartig die Wahrnehmungen sein können, welche wir mit Hülfe der Haut allein in uns aufnehmen, und es kann keinem Zweifel unterliegen, dass, wenn wir Auge und Ohr nicht besitzen würden, dieses Sinnesorgan allein genügen würde, uns eine Welt um uns her zu construiren, die freilich von einem nur beschränkten Kreise eingeschlossen wäre. Denn nur was wir unmittelbar zu erreichen im Stande wären, was wir in directe Berührung mit unserm Körper bringen könnten, würde sich unserer Erkenntniss aufschliessen, und durch irgendeinen Eindruck auf die Haut seine Eigenschaft und Beschaffenheit verrathen, während ein grosser Theil der Dinge und Vorgänge in der Natur uns ein Geheimniss bleiben würde. Wir würden die Gestalt und Form eines Körpers durch Betasten mit den Händen ebenso gründlich kennen lernen wie durch das Auge, zumal wenn wir bedenken, dass sich die geistige Aufmerksamkeit, wie es bei Blinden wirklich der Fall ist, auf den Gefühlssinn in stärkerm Masse concentriren würde. Ueber die Grösse und Dimensionen eines Körpers, den wir betasten können, werden wir nicht im Unklaren sein, sobald wir ihn mit der Grösse unserer Hände und unseres Körpers vergleichen können, die Beschaffenheit seiner Oberflächen, ob sie glatt oder rauh, krumm oder eben sind, wird unserm Urtheil in vollem Masse zugänglich sein. Kurzum die Körper der Natur, soweit sie durch Gestalt sich unterscheiden, würden dem Gefühlssinn allein sich deutlich genug offenbaren, um unserm Leben Anreiz zur Thätigkeit zu bieten. Ja es würde sogar möglich sein, dass unser Verstand aus diesen Wahrnehmungen allein Stoff zum abstracten Denken schöpfen, dass er sich aus ihnen zu dem Begriff einer Linie, eines Winkels, eines Dreiecks u. s. w. erheben könnte, woraus hervorgehen würde, dass die Mathematik eine von den Gesichtswahrnehmungen unabhängige Wissenschaft ist, obgleich sie thatsächlich aus diesen ihren Ursprung genommen hat.

Doch weit mehr als die blosse Form der Gegenstände würden wir durch die Sinnesthätigkeit der Haut über ihre Natur erfahren. Mit Hülfe der Bewegungsorgane unseres Leibes sind wir im Stande die Schwere eines Körpers zu beurtheilen, indem wir die Kraft abschätzen, welche wir aufwenden ihn zu heben. Zugleich aber übt jeder Gegenstand durch seine Schwere einen Druck auf die Haut aus, den wir als solchen empfinden, und aus welchem wir ebenfalls einen Begriff von seinem Gewicht erhalten. Auch jede andere Kraft kann ebenso wie die Schwere als Druck auf die Haut einwirken, und dabei werden wir immer das Vermögen besitzen die Stärke des Druckes abzuschätzen, der auf der Haut lastet. Ein auf die Hand gelegtes Gewicht oder ein freundschaftlicher Händedruck, beide sind in ihren physikalischen Eigenschaften nur wenig voneinander verschieden, so gross auch der Unterschied ihrer psychologischen Wirkungen ist, und bei beiden bemessen wir durch den empfundenen Druck diejenige Kraft, die ihn hervorruft.

Mit diesen Eigenschaften ist aber das Erkennungsvermögen der Haut keineswegs erschöpft, sie besitzt vielmehr noch eine Fähigkeit, die ihr ganz ausschliesslich zukommt und durch kein anderes Organ des Körpers ersetzt werden kann. Während wir die Form der Körper weit besser durch das Auge als durch das Gefühl zu erkennen vermögen und durch letzteres die durch das Auge gewonnene Kenntniss nur zu ergänzen pflegen, während wir ferner eine druckerzeugende Kraft zum grossen Theil durch die Thätigkeit unserer Muskeln abschätzen, bleibt die Empfindung für Wärme und Kälte der Haut allein eigenthümlich und wird von keinem Organ des Körpers mit ihr getheilt. Zwar besitzt das Auge gewisse Kennzeichen, die, durch Erfahrung erworben, uns oft anzeigen ob ein Gegenstand heiss ist, wenn wir ihn z. B. glühend oder dampfend erblicken, aber eine Empfindung für Wärme ist dem Auge nicht gegeben. Eine solche kommt der Haut

allein zu, und von grosser Bedeutung für den Haushalt des Organismus ist es, dass diese Fähigkeit sich über die ganze Oberfläche desselben ausdehnt, denn sie umgibt ihn wie eine Schutzmauer gegen einen schlimmen Feind seiner Existenz, die Kälte, die ungehindert eindringend ihn vernichten würde. Das Herannahen dieses Feindes verräth uns aber ein Allgemeingefühl der Haut, das innerliche Frieren, welches nur durch die Abkühlung der Haut entsteht, und uns mahnt ihn abzuwehren. Nicht minder aber warnt uns auch diese Eigenschaft der Haut vor der Einwirkung zu starker Wärme, die dem Körper ebenso schädlich werden kann wie das Gegentheil. So besitzt denn die Haut verschiedenartige *Qualitäten* der Empfindung. Ebenso wie das Auge unter den Gesichtsempfindungen die Gestalt eines Körpers von seiner Farbe zu trennen weiss, so unterscheidet auch das Empfindungsvermögen der Haut beim Befühlen eines Gegenstandes mancherlei Eigenschaften desselben, seine Form, seine Festigkeit, ob er fest, weich oder flüssig ist, und seine Temperatur.

Die Eigenschaft der Haut, die Form eines Gegenstandes zu erkennen, nennt man *Tastsinn*. Die Eigenschaft der Haut, die Kraft abzuschätzen, mit welcher ein sie berührender Gegenstand dieselbe drückt, nennt man *Drucksinn*. Die Eigenschaft der Haut, Wärme und Kälte zu empfinden, heisst *Temperatursinn*. Aus diesen drei Sinnesempfindungen setzt sich unsere Fähigkeit zusammen, die Eigenschaften der Gegenstände bis zu einer gewissen Grenze durch Befühlen allein zu ermitteln. Der Gefühlssinn der Haut zerlegt sich in diese drei Qualitäten, die sich meistens in eine gleichzeitige Empfindung vereinigen. Für die wissenschaftliche Untersuchung aber ist es nothwendig, sie künstlich zu trennen, gleichsam wie man durch das Prisma das weisse Licht in seine Bestandtheile spaltet, um sie isolirt betrachten zu können.

Ausser diesen specifischen Sinnesempfindungen kommt

der Haut noch eine Empfindung allgemeiner Natur zu, welche auch den innern Organen des Körpers nicht fehlt, nämlich die Schmerzempfindung. Sie entsteht, sobald der einwirkende Reiz eine gewisse Stärke überschreitet, mag dieser durch Druck, durch Wärme oder Kälte oder auf chemischem Wege durch eine ätzende Substanz erzeugt werden. Den Schmerz können wir aber nicht zu den Sinnesempfindungen rechnen, weil wir durch ihn keine Wahrnehmungen über die Beschaffenheit der äussern Dinge machen. Wir können zwar meistens unterscheiden, ob ein Schmerz auf der Haut durch Verbrennung oder durch Aetzen mit Säure oder durch ein scharfes Instrument entstanden ist, aber dies geschieht nur mit Hülfe der begleitenden Sinnesempfindungen, welche aus Druck-, Tast- und Temperaturempfindungen bestehen. Abstrahiren wir von letztern, so hat die Schmerzempfindung an sich in allen Fällen denselben Charakter, was namentlich deutlich hervortritt, sobald die erregende Ursache vorüber ist, während der Schmerz noch anhält. Excessive Kälte, z. B. Berühren von gefrorener Kohlensäure, erzeugt denselben Schmerz wie eine Verbrennung.

Unter Tasten verstehen wir im Sinne des gewöhnlichen Sprachgebrauchs einen ziemlich complicirten Vorgang. Wir bedienen uns beim Tasten der dazu am besten geeigneten Organe, der Hände, an welchen die Fingerspitzen mit dem feinsten Tastgefühl ausgestattet sind. Hierbei besteht aber unsere Thätigkeit nicht nur aus einem blossen Fühlen der Gegenstände, sondern es spielt die Bewegung der Hände dabei eine grosse Rolle, indem wir diese empfindlichen Tastorgane über den Gegenstand, den wir befühlen, wandern lassen. Dieser Vorgang, den wir genauer *actives Tasten* nennen können, besteht somit aus einer Combination von Bewegung und Empfindung, wodurch wir verschiedene Punkte eines Gegenstandes nach und nach mit den empfindlichen Hautstellen in Berührung bringen. Unsere Vorstellung setzt dann die empfundenen Punkte

zu einem Ganzen zusammen, es entstehen daraus Linien, Flächen, kurzum die ganze Oberfläche eines Körpers, dessen einzelne Theile zu einem gemeinsamen Bilde zusammentreten.

Im gewöhnlichen Leben dient der Tastsinn nur zur Unterstützung des Auges; daher kommt es, dass wir ihn nur wenig ausbilden, und im Dunkeln machen wir oft die Erfahrung, wie wenig er zum Erkennen der Dinge ausreicht. Aber durch Uebung kann er sehr bedeutend vervollkommnet werden; das sehen wir an Blinden, welche die Noth zu dieser Uebung zwingt, und das erkennen wir ferner aus dem feinen Tastgefühl der Zunge, welche gewohnt ist im Dunkeln zu tappen, und die in der Mundhöhle so ausserordentlich gut Bescheid weiss, dass sie jedes kleine Eckchen, jedes Winkelchen und jeden Zahn auf das Genaueste kennt.

Viel einfacher als dieser Vorgang ist das Fühlen und Empfinden einer Berührung der Haut. Wenn, ohne dass wir selbst eine Bewegung machen, eine zweite Person irgendeinen Punkt der Haut mit einem Stifte oder Stecknadelknopfe nicht allzu leise berührt, so können wir mit geschlossenen Augen den Ort der Berührung mit mehr oder weniger Sicherheit angeben. Auf den Händen ist dieses Vermögen ein sehr vollkommenes, und um so vollkommener, je mehr wir uns den Fingerspitzen nähern. Hier unterscheiden wir die Berührung der drei Fingerglieder auf das Genaueste voneinander, und können auch den Abstand des berührten Punktes von den Fingerspitzen mit ziemlicher Schärfe bestimmen. Ebenso ist diese Empfindung im Gesicht, auf der Stirn eine sehr ausgesprochene, und auf den Lippen und auf der Zunge eine sehr vollkommene. Die Erfahrung lehrt uns, dass es keinen Theil der Hautoberfläche gibt, welche gegen Berührung, die mit mehr oder weniger Druck ausgeübt werden muss, unempfindlich wäre. Aber die Bestimmung des Ortes ist auf den Armen, Beinen und den übrigen Hautstellen

eine weit weniger genaue als auf den Händen und im Gesicht.

Die Fähigkeit, den Ort der Berührung anzugeben, bezeichnet man als **Ortssinn** der Haut, der ein dem Tastsinn angehörender Factor ist. Das Fühlen einer Berührung an sich genügt noch nicht, um diese Erscheinung zu erklären, die Thätigkeit dieses Processes besteht vielmehr ausserdem noch im Localisiren der empfundenen Berührung. Dieses Vermögen ist eine höhere psychische Thätigkeit, welche offenbar im Gehirn vor sich geht, und lässt sich nur daraus erklären, dass in unserer Vorstellung gleichsam ein Bild unserer Körperoberfläche existirt, in welchem wir den Ort der stattgefundenen Berührung suchen und mit grösserer oder geringerer Sicherheit finden. Wie ist aber nun die Beziehung zwischen Hautoberfläche und dem Vorstellungsvermögen, resp. dem Gehirn, in welchem dasselbe seinen Sitz hat, denkbar. Ueber diese Frage gibt uns die Nervenphysiologie genügenden Aufschluss.

Eine grosse Zahl von Empfindungsnerven treten aus dem Gehirn und dem Rückenmark zur Haut, sie bestehen alle aus einer sehr grossen Zahl von Fasern, welche sich in der Nähe der Haut voneinandertrennen und hier in eigenthümlicher Weise enden.

Die Haut selbst besteht aus drei Schichten (Fig. 1).* Auf dem Zellgewebe *d f* unter der Haut, das zuweilen sehr fettreich ist, liegt die erste Schicht, die sogenannte Lederhaut (von *c* bis *b*), die aus einem ziemlich derben Gewebe besteht und sich beim Gerben in Leder verwandelt. Sie besitzt auf ihrer Oberfläche eine mehr oder weniger grosse Zahl von cylinder- oder kegelförmigen Hervorragungen (bei *e*), welche man die **Gefühlswärzchen** oder **Papillen** nennt. Auf der Lederhaut liegt die **Schleimschicht** *b*, welche aus einer grossen Zahl kleiner mikroskopischer Zellen besteht

* Kölliker, Gewebelehre.

und die Vertiefungen zwischen den Papillen der Lederhaut genau ausfüllt. Die erstere Schicht endlich ist die Hornschicht oder Oberhaut *(Epidermis) a*, welche eine zusammenhängende feste Haut bildet, aber auch aus zusammengewachsenen Zellen besteht, die von fester Hornsubstanz erfüllt sind. Die Blutgefässe und Nerven dringen nur bis zur Oberfläche der Lederhaut

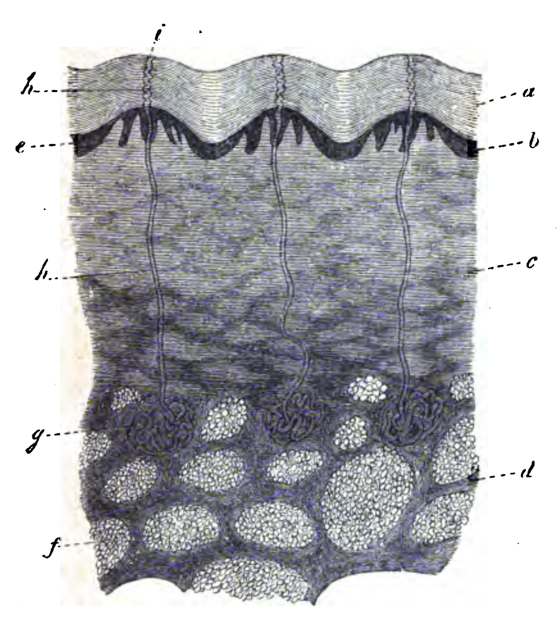



*Fig. 1.*

und bis in die Papillen derselben, die Schleimschicht und die Epidermis sind von Blut und Nerven vollkommen frei. Man sieht ferner in der Figur die Schweissdrüsen *g* in der Haut liegen, deren Kanäle *h* die Haut bis zur Oberfläche durchbohren (*i*). Die in einzelne Fasern sich auflösenden Hautnerven treten nun in die Leder-

haut ein, und hier beobachtet man eine eigenthümliche Endigungsweise derselben in den Papillen. Viele von diesen enthalten nämlich ein eiförmiges Körperchen b (Fig. 2), an welches eine Nervenfaser c herantritt und nach einigen Windungen *dd* um dasselbe sich verliert. Sie sind die Tastkörperchen genannt worden, und es kann keinem Zweifel unterliegen, dass sie der Tastempfindung als Sinneswerkzeug dienen. Man findet sie nämlich nicht in allen Hautstellen in gleicher Zahl, und zwar am zahlreichsten da, wo das Tastgefühl am feinsten ist, und sparsamer dort, wo das Tastgefühl

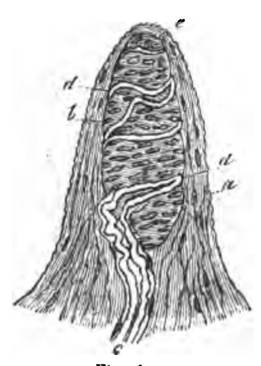



*Fig. 2.*

stumpfer ist. Ausserordentlich dicht stehen sie an den Fingerspitzen, wo in dem Raum von einer Quadratlinie ungefähr 100 gezählt worden sind, und ziemlich zahlreich sind sie über die ganze Handfläche verbreitet, während sie auf dem Handrücken in viel geringerer Zahl vorkommen. Auf der Handfläche stehen auch die Papillen, von denen nicht jede ein Tastkörperchen enthält, sehr zahlreich und in regelmässigen Reihen angeordnet, wodurch die eigenthümlich gestreifte Zeichnung der Haut entsteht, welche man auf der Handfläche wahrnimmt. Auch andere Endigungsweisen der Haut-

nerven sind beobachtet worden, welche denen in den Tastkörperchen ähnlich sind, z. B. in länglichen Bläschen (Pacini'sche Körperchen), in deren Höhle die Nervenfaser endet. Kurzum, es gibt in der ganzen Hautoberfläche Endorgane eigenthümlicher Art für die Empfindungsnerven, und wenn wir den Vorgang der Empfindung physiologisch weiter zergliedern wollen, so müssen wir von der Erregung einer an einer bestimmten Hautstelle endenden Nervenfaser ausgehen, und den Ablauf dieser Erregung nach dem Gehirn hin weiter verfolgen.

Die Nervenbahn zwischen Haut und Gehirn, auf welcher die durch einen Reiz erzeugte Erregung sich fortpflanzt, lässt sich anatomisch bis zu einer gewissen Grenze genau bestimmen. Eine in der Haut endende Nervenfaser bildet bis zur Einsenkung in das Rückenmark oder Gehirn ein langes, feines, nirgends unterbrochenes Fädchen. Es vereinigen sich zwar die Fasern der Haut sehr bald zu kleinen Zweiglein, Aestchen und schliesslich zu dicken Nervenstämmen, bevor sie in die Centralorgane des Nervensystems eintreten, aber nirgends findet in diesen Nervenästen eine Verschmelzung zweier Fasern statt. Wir dürfen daher wol annehmen, dass von allen Hautstellen isolirte Verbindungen zu den Centren des Nervensystems bestehen, welche hier gleichsam wie telegraphische Leitungen in einer Endstation zusammenlaufen.

Die Nervenphysiologie, welche namentlich durch das Studium der Vorgänge in den Bewegungsnerven grosse Fortschritte gemacht hat, belehrt uns nun über den Verlauf der Nervenerregung, und führt uns zu dem Resultat, dass die Erregung einer Faser sich durch die ganze Länge derselben fortpflanzt, ohne sich den anliegenden Fasern mitzutheilen. Eine telegraphische Leitung muss bekanntlich durch eine gute Isolation vor jeder Nebenleitung des elektrischen Stromes wohl geschützt werden, wenn eine Nachricht die beabsichtigte Station erreichen soll. Die Nervenfasern dagegen, in denen

wir es mit einem ganz andern, weit langsamer als die Elektricität sich fortpflanzenden Vorgange zu thun haben, bedürfen einer solchen Isolation nicht, und obgleich sie sich zu vielen Tausenden dicht aneinanderlegen, gestatten sie doch keine Uebertragung der Erregung aufeinander.

Wenn wir nun durch Berührung einer Hautstelle eine dort endende Nervenfaser erregen, so pflanzt sich in ihr isolirt die Erregung bis zur Ursprungsstelle in dem Nervencentrum fort. Erst wenn die Erregung hier angelangt ist, entsteht daselbst der Vorgang der Empfindung, von dem wir nicht wissen, worin er eigentlich besteht, der aber nur im Nervencentrum zu Stande kommen kann. Diese Empfindung ist zugleich mit dem Bewusstsein verknüpft, dass der Reiz auf eine ganz bestimmte Stelle der Haut eingewirkt hat; ja, wir verlegen sogar den ganzen Vorgang der Empfindung in unserer Vorstellung in die Haut selbst, obgleich er nicht in dieser, sondern im Gehirn stattfindet. Es ist uns absolut nicht möglich, die Empfindung selbst von dem Orte der Reizung zu trennen. Reizung und Empfindung fallen in unserer Vorstellung örtlich vollständig zusammen, und dass sich die Sache in Wirklichkeit nicht so verhält, lehrt uns erst das physiologische Experiment oder krankhafte Processe in den Nerven. Die Durchschneidung eines Nerven, welche die Empfindung in einem Körpertheile aufhebt, überzeugt uns davon, dass die Empfindung selbst in den Gliedern des Körpers nicht entstehen kann, dass sie auch in dem Nerven selbst nicht ihren eigentlichen Sitz haben kann, und dass ein Nerv sie nur dann hervorzubringen vermag, wenn er mit Hirn und Rückenmark noch in Verbindung steht.

Es ist ein für alle Empfindungs- und Sinnesnerven allgemein gültiges Gesetz, dass wir die Empfindung, welche sie erzeugen, in die Endorgane derselben verlegen, an diejenige Stelle, wo die erregende Ursache, der Reiz, einwirkt. Dies gilt nicht nur für die Empfindungs-

nerven der Haut, sondern in viel höherm Masse für den Sehnerven, dessen Erregung in der Netzhaut des Auges stattfindet. Die Gesichtsempfindung selbst aber kann nur im Gehirn vor sich gehen, denn sie erlischt, wenn der Sehnerv durchschnitten ist, und doch verlegen wir das empfundene Bild nach aussen und projiciren es vom Auge aus in die uns umgebende Aussenwelt. Wir können uns diese Thatsache, welche man das Gesetz der excentrischen Empfindung nennt, nicht anders erklären als durch die Annahme, dass sich unser Vorstellungsvermögen einzig und allein durch die Erfahrung ausbildet. Wir wissen aus Erfahrung, welche Empfindung wir haben, sobald eine Berührung der Haut stattfindet, und da wir uns im Leben tausendfach davon überzeugt haben, dass die Ursache dieser ganz bestimmten Empfindung nur durch die Berührung der Haut hervorgerufen wird, da wir ferner gar kein Zeichen dafür haben, dass eine Erregung sich durch einen ganz langen Nerven bis zum Hirn fortpflanzt, so verlegt unsere Vorstellung den ganzen Vorgang der Empfindung infolge der gemachten Erfahrung an diejenige Stelle, wo die erkennbare Ursache der Reizung vorhanden ist.

Mit Hülfe dieser Betrachtungen können wir uns auch den Ortssinn der Haut erklären, das Vermögen, einen dort einwirkenden Reiz richtig zu localisiren. Von allen Stellen der Haut laufen die Nervenfasern in isolirter Leitung gleichsam wie Telegraphendrähte in das Nervencentrum des Gehirns ein, in welchem eine bewusste Empfindung zu Stande kommt. Das Gehirn ist also die Endstation dieser Nervenleitungen, welche gleichsam die auf ihnen beförderten Depeschen in Empfang nimmt und zum Bewusstsein bringt. Das Gehirn unterscheidet aber auch sehr genau, auf welcher Leitung eine solche Depesche von aussenher ankommt, und ebenso wie ein Telegraphist in einem Telegraphenbureau, in welchem eine grosse Zahl von Drähten von allen Seiten hineinlaufen, aus Erfahrung weiss, von

welcher Richtung her ein jeder Draht Nachricht bringt, so weiss auch das Gehirn aus der Erfahrung, die es sich erworben, sehr genau, wo eine Erregung herkommt, wenn sie durch eine bestimmte Nervenfaser anlangt, und versetzt deshalb die ganze Empfindung an diejenige Hautstelle, welche gereizt worden ist. Wir können uns denken, dass das Gehirn sich in seinem Vorstellungsvermögen ein vollständiges Bild unserer Körperoberfläche entworfen hat, welches durch die gemachten Erfahrungen allmählich gebildet und immer mehr vervollkommnet worden ist. Mit diesem Bilde oder vielmehr mit demjenigen Theile des Gehirns, wo dieses Bild entworfen ist, stehen die eintretenden Nervenfasern in einer ganz bestimmten Beziehung, und man kann sich vorstellen, dass jeder Punkt unserer Körperoberfläche mit seinem entsprechenden Bildpunkte im Gehirn in einer leitenden Verbindung steht. Wenn nun eine Erregung auf einer bestimmten Nervenfaser zugeleitet wird, so erweckt sie im Gehirn das Bild derjenigen Hautstelle, an welcher der Reiz stattgefunden hat.

Man sieht ein, dass wenn eine richtige Localisation der Empfindung vorhanden sein soll, alle Leitungen von der Haut zum Gehirn gut in Ordnung sein müssen. Würde die Erregung sich von einer Nervenfaser auf die andere übertragen, so würde das Gehirn nicht mehr unterscheiden, von welchem Orte sie hergekommen ist, und wäre nicht im Stande den Reiz zu localisiren.

Sehr interessant ist eine Beobachtung, welche häufig an Menschen gemacht wird, bei denen zum Zwecke einer Operation ein Hautstück aus seiner ursprünglichen Lage entfernt und an einer andern Stelle eingeheilt wird. Um z. B. eine durch krankhafte Processe geschwundene oder durch angeborenen Mangel fehlende Nase zu ersetzen, machen die Chirurgen eine derartige Operation, indem sie ein dreieckiges Stück Haut von der Stirn ablösen, so dass es nur an seiner Spitze mit

der Nasenwurzel zwischen den Augenbrauen zusammenhängt, dann dasselbe seitwärts nach unten umklappen und an Stelle der Nase in die Gesichtshaut einnähen. Die neue Nase heilt nun nach kurzer Zeit vollständig ein, wenn man aber dieselbe mit einer Nadel sticht, so fühlt der Patient den Stich nicht in dieser Nase, sondern er gibt an, den Stich in der Stirn zu fühlen, da wo die Nasenhaut früher gesessen hat. Diese Empfindung dauert noch sehr lange nach der Operation an, und erst allmählich kommt der Besitzer der neuen Nase zu dem Bewusstsein, dass der Ort der Empfindung jetzt ein anderer geworden ist, und lernt so durch Erfahrung nach und nach diesen Ort richtig anzugeben.

Eine ähnliche, nicht minder interessante Beobachtung macht man an Amputirten. Dieselben geben sehr häufig an, dass sie in den amputirten Beinen oder Armen Empfindungen haben, als wenn diese Glieder noch existirten. Sie haben darin das Gefühl von Frost und Wärme, geben an, dass sie in diesen oder jenen Zehen des verlorenen Beines Schmerz empfinden, haben das Gefühl von Kitzel, Jucken u. s. w., und bezeichnen genau die Hautstelle, wo diese Empfindung stattfindet. Die Erklärung dieser Thatsache ist nun ganz einfach. In dem Stumpfe des amputirten Gliedes liegen die durchschnittenen Nervenstämme, welche das ganze Glied mit Empfindungsnerven versehen haben. An dieser Stelle treten häufig in der verheilten Narbe Reizungen der Nervenstämme ein, und da diese Erregungen der Nerven dem Gehirn zugeleitet werden, so erzeugen sie eine Empfindung und erwecken gleichzeitig hier, man möchte sagen aus alter Gewohnheit, das Bild desjenigen Körpertheils, in welchem sie naturgemäss enden. Das Gehirn verlegt daher auch alle diese Empfindungen nach der im Leben einmal erworbenen Erfahrung nach aussen in dasjenige Körperglied, von welchem die erregten Nerven herkommen, auch dann, wenn dieses Glied gar nicht mehr vorhanden ist.

Diese sehr merkwürdige Erscheinung ist ein offe
barer Beweis dafür, dass der Vorgang der Empfindu
selbst nur in den Nervencentren des Gehirns stattfi
det, da sogar, wenn ein Körpertheil fehlt, die Empfi
dung von seiner Existenz und von Reizungen desselb
noch nicht schwindet.

---

## Zweites Kapitel.

Empfindlichkeit des Tastsinnes. — Die Empfindungskreise auf der Haut. — Beziehung des Tastsinnes zur Gehirnthätigkeit. — Täuschungen des Tastsinnes.

Das Tastvermögen ist nicht an allen Stellen der Haut gleich stark entwickelt. Wir wissen aus Erfahrung, dass dasselbe auf den Händen gut ausgebildet ist, weil wir uns dieser Organe zum Betasten der Gegenstände bedienen. Die Hand ist vermöge ihrer Beweglichkeit und ihres gegliederten Baues schon vor allen andern Körpertheilen ganz besonders zu dieser Thätigkeit geeignet, und wir finden ganz allgemein in dem Thierreiche, dass alle zum Tasten bestimmten Organe mit einer möglichst grossen Beweglichkeit ausgestattet sind, so die Fühler der Insekten, der Rüssel des Elefanten und die Zunge aller Thiere. Aber die Beweglichkeit allein reicht noch nicht aus, um einem solchen Organe die Function eines Tastorganes zu verleihen, sondern seine Oberfläche muss ausserdem mit einem feinen Tastgefühl versehen sein, wodurch es befähigt wird feine Raumunterschiede wahrzunehmen.

Andere Körpertheile als die Hand, höchstens der Fuss, sind zum Tasten äusserst wenig geeignet, und dies nicht allein wegen ihrer unbequemen Lage und mangelhaften Form, sondern auch weil ihre Haut einen

weit weniger ausgebildeten Ortssinn besitzt. Es würde uns z. B. sehr schwer werden, nur mit Hülfe des Armes bei geschlossenen Augen die Gestalt eines noch so einfachen Körpers zu bestimmen, mit der Fussfläche würde uns dies schon leichter gelingen, während wir mit der Hand sehr schnell zum Ziele kommen. Es erscheint äusserst natürlich, dass die der Bewegung am meisten fähigen Glieder auch das feinste Tastgefühl haben, und man kann wohl mit Recht sagen, dass es sich hier höchst wahrscheinlich durch Uebung entwickelt und durch Vererbung weiter übertragen hat. Bei den Affen deren Fuss der Hand gleich zum Greifen eingerichtet ist, wird das Tastgefühl in beiden Gliedmassen ziemlich gleich ausgebildet sein, weil beide in gleicher Weise im Tasten geübt werden. Beim Menschen, dessen Fuss zu einem Gehwerkzeug umgestaltet ist, tritt das Tastvermögen in diesem Gliede weit hinter dem der Hand zurück; aber interessant ist es zu beobachten, dass gelegentlich bei Menschen, denen die Arme fehlen, das Tastgefühl in den Füssen in hohem Masse durch Uebung ausgebildet werden kann, sodass sie bei gleichzeitig zunehmender Beweglichkeit damit zu schreiben und mancherlei Händewerk zu verrichten im Stande sind.

Durch eine sehr sinnreiche Methode ist die Feinheit des Tastsinnes oder genauer des Ortssinnes an verschiedenen Stellen der Haut von Ernst Heinrich Weber einer Messung unterworfen worden. Dieselbe beruht auf folgendem höchst interessanten Experiment, das jeder mit grösster Leichtigkeit nachmachen kann. Es gehören zu diesem Versuche zwei Personen, von denen die eine das Tastgefühl der andern prüft. Man nimmt zu diesem Zwecke einen Zirkel und setzt die beiden etwas abgestumpften Spitzen in einem gewissen Abstande voneinander auf eine Hautstelle der andern Person auf. Diese muss nun mit geschlossenen Augen angeben, ob sie die Berührung zweier getrennter Spitzen fühlt, oder ob beide Spitzen in eine zu verschmelzen scheinen.

Der Erfolg dieses Versuchs ist an weniger empfindlichen Hautstellen ein höchst überraschender. Wenn man z. B. die Spitzen auf die Mitte des Unterarms in der Längenrichtung des Armes in einem Abstande von ungefähr vier Centimetern aufsetzt, so wird man noch deutlich das Gefühl einer doppelten Empfindung haben, sobald man aber den Abstand der Spitzen unter drei Centimeter vermindert, so fühlt man nur die Berührung einer einzigen Spitze, d. h. es vereinigen sich dann beide Berührungen zu einer gemeinsamen Empfindung, und es ist für jeden, an dem dieses Experiment vorgenommen wird, ein überraschender Anblick, wenn er sich beim Oeffnen der Augen davon überzeugt, dass trotzdem zwei Punkte der Haut in so beträchtlicher Entfernung voneinander berührt worden sind.

Man kann nun durch den Versuch für jede Hautstelle diejenige Entfernung ermitteln, bis zu welcher man die Zirkelspitzen einander nähern kann, ohne dass die doppelte Empfindung sich in eine einfache verwandelt, und je kleiner dieselbe ist, desto feiner ist der Ortssinn an dieser Hautstelle. Nach dieser Prüfung erweist sich denn die Zungenspitze am empfindlichsten, da sie bei ein Millimeter Abstand schon eine doppelte Empfindung hat. Es folgen dann erst die Fingerspitzen, welche einen Abstand von zwei Millimeter zu unterscheiden vermögen. Auf der Hand nimmt der Ortssinn nach dem Handgelenk hin stetig ab und ist auf der Handfläche bedeutend feiner als auf dem Handrücken, der bei einer Entfernung von vier bis fünf Millimeter keine doppelte Empfindung mehr zeigt.

Im Gesicht besitzen die Lippen ein ziemlich feines Ortsgefühl. Setzt man die Spitzen in der Nähe des Ohres auf die Wange auf, sodass man deutlich beide unterscheidet, und führt sie langsam nach den Lippen hin, so hat man das Gefühl, als ob sich die beiden Spitzen voneinander entfernten. Es nimmt nämlich hier mit der Annäherung an den Mund die Feinheit des Ortssinnes zu, und indem die Unterscheidung der

berührten Punkte immer deutlicher wird, scheint es uns, als ob sie auch auseinanderrückten. Ganz ähnlich ist die Empfindung, wenn man die Spitzen quer auf den Unterarm aufsetzt und sie langsamer nach der Hand bis zu den Fingerspitzen fortführt. Auch hier glaubt man, dass die beiden Linien, welche die Spitzen zeichnen, obgleich sie parallel sind, immer mehr auseinanderweichen, weil der Ortssinn nach den Fingern hin in hohem Grade wächst.

Das stumpfeste Tastgefühl besitzt die Haut des Rückens, welche zwei Spitzen in einer Entfernung von vier bis sechs Centimeter noch als eine einfache Berührung empfindet. Es ist ganz erstaunlich, wie gross der Abstand der beiden Spitzen hier gewählt werden muss, bis die doppelte Empfindung deutlich zum Bewusstsein kommt. In den Armen und Beinen nimmt der Tastsinn mit der Entfernung vom Rumpfe zu, übereinstimmend mit der zunehmenden Beweglichkeit dieser Theile, und ausserdem ist auf ihrer Beugeseite die Empfindlichkeit grösser als auf der Streckseite. Wenn man nun für irgendeine Hautstelle die genannte Entfernung der beiden Spitzen genau misst, bei welcher die doppelte Empfindung gerade in eine einfache übergeht, und diese Messung nach vielen Richtungen hin daselbst ausführt, so erhält man für die geprüfte Hautstelle eine kreisförmige Figur, innerhalb welcher zwei beliebige gleichzeitig berührte Punkte nur einfach empfunden werden. An vielen Hautstellen, z. B. am Arme, bildet diese Figur ein längliches Oval, weil in der Querrichtung das Unterscheidungsvermögen ein besseres ist als in der Längsrichtung. Man nennt nun eine solche Figur, welche mehr oder weniger kreisförmig ist, einen Empfindungskreis der Haut, und man hat durch genaue Messung die Haut des ganzen Körpers in Empfindungskreise getheilt, welche an Grösse ausserordentlich verschieden sind, und auch in ihrer Gestalt erheblich voneinander abweichen.

Eine interessante Beobachtung erklärt sich aus der

Existenz solcher Empfindungskreise. Wenn man a
die Haut ein Metallrohr mit dreieckigem, kreisförmig
oder viereckigem Rande aufdrückt, so gelingt es ni
so leicht, die Figur des Rohres dadurch zu erkenne
Je kleiner die Empfindungskreise sind, desto leicht
wird dies, und desto kleiner kann der Durchmesse
des Rohres sein. Auf unempfindlichen Hautstellen ab
ist die Empfindung immer dieselbe, welche Gestalt d
Rohr auch haben mag, solange dessen Grösse de
Durchmesser eines Empfindungskreises nicht erheblic
übertrifft. Denn wenn alle Punkte des Randes inne
halb eines einzigen Empfindungskreises liegen, so ver
schmelzen sie alle in einen einzigen Punkt. Auf de
Arme können wir daher ein dreieckiges, kreisförmige
und viereckiges Rohr von zwei Centimeter Durchmesse
nicht voneinander unterscheiden, während dies mit Hül
der Hohlhand sehr leicht gelingt.

Complicirtere Figuren als die ebengenannten sin
natürlich noch schwerer zu erkennen. Es kann sic
jeder leicht davon überzeugen, wie gut man einen i
die Hohlhand mit einem Griffel eingeschriebenen Buch
staben oder sogar Worte versteht, wenn sie nur ei
mässige Grösse haben, während dies auf dem Arm
schon schwierig wird, und auf dem Rücken nur seh
gross ausgeführte Buchstaben erkannt werden. Uebri
gens ist in diesem Falle die Erkennung leichter, a
wenn man eine fertige Figur auf die Haut aufdrück
weil die Aufmerksamkeit Zeit hat, sich jedem einzelne
Punkte der Figur zuzuwenden. Immer muss aber ei
Buchstabe, um verstanden zu werden, über mehre
Empfindungskreise sich erstrecken.

Um zu einer Einsicht in die oben angeführten That
sachen zu gelangen, müssen wir auf die anatomisch
Beziehung zwischen Haut und Nervencentrum im Ge
hirn zurückgreifen. Wir wissen, dass alle Hautstelle
durch getrennte Nervenfasern versorgt werden, in dene
die Erregung isolirt fortgeleitet wird, und wir habe
uns die Vorstellung gemacht, dass das Gehirn aus Er

fahrung gelernt habe, welcher Hautstelle jede einzelne Nervenfaser, die ihm von aussen Nachricht bringt, angehört. Man hat, um diese Vorstellung noch genauer zu präcisiren, gesagt, dass jede Nervenfaser im Gehirn mit einem Localzeichen versehen sei, d. h. mit einem Erkennungszeichen, welches die Hautstelle verräth, in der die Faser endet. Doch mit diesem Worte ist natürlich nichts weiter erklärt, und es ist besser daran festzuhalten, dass die Fähigkeit des Gehirns, den Ort des Reizes an der Nervenfaser selbst zu erkennen, eine durch Erfahrung erworbene Eigenschaft ist.

Nun machen wir aber die Wahrnehmung, dass diese Fähigkeit des Gehirns ihre Grenzen hat, denn es gibt an allen Hautstellen einen Abstand zweier Punkte, in welchem sie beide nicht mehr unterschieden werden, sondern in einen Punkt verschmelzen, und dieser Abstand kann an vielen Hautstellen sogar ein sehr bedeutender sein. Alle in einem Empfindungskreise liegenden Punkte vermag das Gehirn nicht mehr voneinander zu sondern und alle Erregungen, welche von diesen Punkten aus dem Gehirn zugeleitet werden, verschmelzen in der Vorstellung zu einer einzigen Erregung.

Die am nächsten liegende Erklärung für diese Erscheinung würde nun darin bestehen, anzunehmen, dass ein ganzer Empfindungskreis immer von einer einzigen Nervenfaser versorgt wird. Man könnte sich denken, dass die Endausbreitung einer Faser sich über den Raum je eines Empfindungskreises erstreckt, und dass je nach der Grösse des letztern auch die Endbezirke der Fasern verschieden gross seien.

Gegen eine solche Annahme sprechen aber gewichtige Gründe. Man hat zwar beobachtet, dass in der Haut sich die Nervenfasern vielfach theilen, aber da die Empfindungskreise an unempfindlichen Hautstellen einen so grossen Durchmesser bis zu sechs Centimeter besitzen, so würde daraus folgen, dass eine einzige Nervenfaser sich über einen so grossen Raum ausbreite. Das ist aber nicht denkbar, denn obgleich in einem grossen

Empfindungskreise ein Unterscheidungsvermögen für weit voneinanderliegende Punkte nicht vorhanden ist, so gibt es doch in diesem Kreise keinen einzigen Punkt, der nicht empfindlich wäre, und wenn daher ein grosser Empfindungskreis nur eine Faser vom Gehirn her erhielte, so müsste sich diese in eine undenkbar grosse Zahl von Fasern spalten, um den ganzen Kreis zu versorgen.

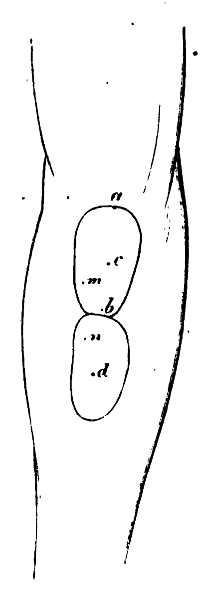


*Fig. 3.*

Ferner spricht folgende Erscheinung gegen diese Annahme. Es seien (Fig. 3) die Empfindungskreise 1 und 2, welche aneinanderstossen, auf dem Arme um die Mittelpunkte *c* und *d* gemessen. Wenn nun der Kreis 1 von einer Faser 1 versorgt würde, der Kreis 2 von einer andern Nervenfaser 2, so liesse sich schon verstehen, dass die Punkte *a* und *b*, welche innerhalb von 1 liegen, nur einfach empfunden werden, weil von ihnen aus dieselbe Nervenfaser erregt wird. Aber die Berührung der Mittelpunkte *c* und *d*, welche dieselbe Entfernung voneinander haben wie *a* und *b*, müsste nun nach dieser Annahme nicht einfach, sondern doppelt erscheinen, da sie verschiedenen Nervenfasern angehören. Ja es müssten sogar zwei noch viel nähere Punkte, *m* und *n*, doppelt empfunden werden, weil sie auch in dem Endbezirk zweier Fasern liegen. Das ist aber alles nicht so. Die Punkte *c* und *d* erscheinen in diesem Falle auch einfach und noch viel mehr gilt dies von den Punkten *m* und *n*.

Wir sehen also, dass der Endbezirk einer einzigen Nervenfaser unmöglich die Grösse eines ganzen Empfindungskreises haben könne. Es müsste sonst merkbare Grenzen derselben geben, wo die Erscheinungen

sich, wie eben gezeigt, verhalten müssten. Wenn wir mit den Zirkelspitzen aus dem Empfindungskreise 1 gegen den Kreis 2 vorrückten, so müsste ja plötzlich eine doppelte Empfindung eintreten, sobald eine Zirkelspitze die Grenze überschreitet, und da dies nicht der Fall ist, so folgt daraus, dass es solche feste Grenzen in dem besprochenen Sinne auf der Haut nicht gibt.

Die beste Erklärung für alle bisher angeführten Thatsachen rührt von Ernst Heinrich Weber her, einem Forscher, der sich in diesem Gebiet der Physiologie nicht minder als in andern so grosse Verdienste erworben hat. Er nimmt an, dass die Endbezirke einer Nervenfaser viel kleiner sind als die durch Messung gefundenen Empfindungskreise, sodass diese immer eine grössere Zahl von isolirten Fasern empfangen. Wenn nun zwei Endbezirke gereizt werden, so entsteht nur dann eine getrennte Empfindung, wenn zwischen diesen eine gewisse Zahl ungereizter Endbezirke liegen. Diese innerhalb der erregten Punkte befindlichen ruhenden Endbezirke, deren Fasern nicht mit erregt werden, bringen erst im Gehirn das Bewusstsein hervor, dass es sich um zwei getrennte Punkte der Haut handelt, und zugleich gibt die Zahl der unerregten Fasern dem Gehirn einen Masstab dafür, wie weit die berührten Punkte voneinander entfernt sind.

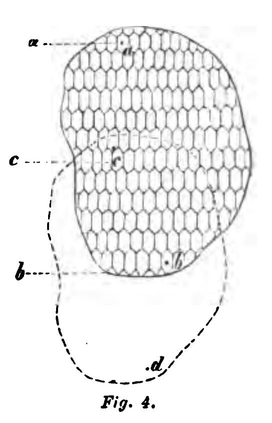


*Fig. 4.*

In Fig. 4 stellen die kleinen sechseckigen Feldchen die Endbezirke der Nervenfasern vor. Nehmen wir an, es seien zwölf zwischenliegende Feldchen nothwendig, damit zwei Eindrücke gesondert wahrgenommen werden. Es werden also *a* und *b* auf der Grenze der einfachen Empfindung liegen. Ebenso aber auch *c* und *d*, da dieselbe Zahl

von Endbezirken zwischen ihnen liegen. Auch sieht man nun ein, weshalb beim Verschieben der Zirkelspitzen die einfache Empfindung nicht plötzlich in eine doppelte übergehen kann, denn solange weniger als zwölf Endbezirke zwischen den Spitzen liegen, bleibt die Empfindung einfach. Ueberhaupt wird aus dieser Vorstellung klar, dass ein Empfindungskreis keine festen Grenzen auf der Haut hat, sondern dass man ihn sich beliebig verschoben denken kann, wie dies die punktirte Linie (Fig. 4) darstellt, solange er nur die bestimmte Zahl von Endbezirken der Nervenfasern nach allen Durchmessern hin einschliesst.

Die Haut ist sonach gleichsam durch die Endbezirke der Nervenfasern mosaikartig eingetheilt von denen jede einem Mosaikfelde angehört, welches wir als das Tastfeld dieser Faser bezeichnen können. Die Berührung eines Tastfeldes erzeugt in unserm Gehirn die Vorstellung eines ganz bestimmten Ortes auf der Haut, aber wenn zwei nebeneinanderliegende Tastfelder berührt werden, so entsteht noch nicht die Empfindung zweier getrennter Punkte, weil wir sie nicht durch irgendein Merkmal voneinander sondern können. Dass sich dies so verhalten muss, wird uns klar werden, wenn wir eine linienförmige Kante, den scharfen Rand einer Platte, auf die Haut aufsetzen und die dadurch hervorgerufene Empfindung näher betrachten. Die unmittelbare Empfindung, welche wir haben, sagt uns, dass uns der Erfahrung gemäss eine gerade Linie berührt. Diese Linie durchschneidet (Fig. 5) eine gewisse Zahl von Tastfeldern, in denen je eine Nervenfaser erregt wird. Wenn nun in den benachbarten Tastfeldern 1 und 2, 2 und 3 u. s. w. eine getrennte Empfindung entstünde, wenn wir die Punkte in 1 von den Punkten in 2 örtlich trennen würden, so müsste uns die ganze Linie aus Punkten zusammengesetzt erscheinen. Da wir aber nicht die Empfindung einer unterbrochenen Berührung haben, so geht daraus hervor, dass wir zwei benachbarte Tastfelder

*Fig. 5.*

örtlich nicht voneinanderscheiden können. Eine örtliche Trennung ist vielmehr erst dann denkbar, wenn zwischen den beiden erregten Tastfeldern mindestens **ein** unerregtes Tastfeld liegt, weil nur durch dieses unerregte Tastfeld das Bewusstsein in unserer Seele erweckt werden kann, dass zwei räumlich getrennte Reize vorhanden seien.

Ein einziges unerregtes Tastfeld zwischen den erregten reicht aber nicht aus, um die Empfindung zweier berührten Punkte zu einer doppelten zu machen; die Erscheinungen des Tastsinnes erklären sich vielmehr erst dann ungezwungen, wenn man mit Ernst Heinrich Weber die Annahme macht, dass eine grössere Zahl von Tastfeldern zwischen den gereizten Feldern liegen müsse, damit wir den Eindruck empfangen, dass es sich um die Reizung zweier verschiedener Hautstellen handelt.

Alle **Sinnesempfindungen**, deren wir fähig sind, werden erst dann zu einer **Sinneswahrnehmung**, wenn gewisse geistige Operationen durch die Sinneserregung erweckt werden.

Sehr häufig können wir die Beobachtung machen, dass unter gewissen Bedingungen Eindrücke gar nicht zum Bewusstsein kommen, obgleich sie doch unzweifelhaft auf unsere Empfindungsnerven in nicht unerheblichem Grade eingewirkt haben. Wenn sich z. B. jemand in lebhafter Unterhaltung mit einer Person befindet, und wir währenddessen die Hand auf seine Schultern legen, so kommt es nicht selten vor, dass diese sonst leicht merkbare Berührung gar nicht gefühlt wird, oder vielmehr dass sie nicht die gewünschte Wirkung hervorruft. Man pflegt dann zu sagen, dass die Aufmerksamkeit durch das Gespräch so sehr in Anspruch genommen war, dass sie für andere Eindrücke unzugänglich wurde, oder noch einfacher, „man sei zu sehr in das Gespräch vertieft gewesen“.

Dieser Ausdrucksweise liegt eine ganz richtige, physiologisch annehmbare Anschauung zu Grunde. Die

stattgefundene Berührung der Schulter hat nämlich ohne Zweifel auch in diesem Falle die Hautnerven erregt, diese haben auch ganz gewiss ihre Erregung dem Rückenmark und dem Gehirn zugeleitet, und in ihnen den Vorgang der Empfindung angeregt. Aber das Gehirn befand sich in diesem Augenblicke nicht in demjenigen Zustande, in welchen alle anlangenden Erregungen und hervorgerufenen Empfindungen ungehindert dem Bewusstsein zugeleitet werden, und dadurch eine Wahrnehmung erzeugen, vielmehr war das Gehirn in diesem Augenblicke in voller Thätigkeit begriffen, und die Organe des Bewusstseins und des Willens waren damit beschäftigt, Vorstellungen wachzurufen, sie zu bilden und dieselben mit Hülfe von Bewegungsnerven und Muskeln in eine verständliche Sprache zu übersetzen. Das waren offenbar die Vorgänge im Gehirn, welche der einwirkenden Empfindung den Weg zum Bewusstsein gleichsam abschnitten, somit eine Art von Hemmung erzeugten, durch welche die anlangende Erregung vernichtet wurde, ohne eine Wirkung hervorzurufen.

Wir flechten diese Betrachtung hier nur ein, um zu zeigen, wie eng die Sinnesempfindung mit den Vorgängen des Seelenlebens, die beide im Gehirn stattfinden, verknüpft ist. Was hier nur für den Gefühlssinn ausgeführt ist, lässt sich auch auf alle andern Sinne ausdehnen. Der Gefühlssinn ist aber derjenige, für welchen sich durch mannichfache interessante Experimente nachweisen lässt, dass alle Empfindungen unsers Körpers niemals in dem Sinneswerkzeuge selbst zu Stande kommen, sondern immer erst im Gehirn, wo die Sinnesnerven ihren Ursprung haben.

Einige sehr merkwürdige Beobachtungen, welche bei der Untersuchung der Empfindungskreise gemacht worden sind, erklären sich sehr wohl aus diesen Anschauungen. Die Grösse eines Empfindungskreises ist nämlich für dieselbe Hautstelle nicht nur bei verschiedenen Personen verschieden, sondern sie schwankt

auch bei ein und derselben Person zu verschiedenen Zeiten nicht unbeträchtlich. Am interessantesten aber ist die Thatsache, dass die kleinste wahrnehmbare Distanz auf einer Hautstelle sich durch fortgesetzte Uebung nicht unerheblich verkleinert, namentlich an solchen Stellen, welche von Natur nicht sehr empfindlich sind und grosse Empfindungskreise besitzen. Wenn aber diese Uebung aufhört, so nimmt auch der verfeinerte Tastsinn sehr bald wieder ab. Ebenso interessant ist die Beobachtung, dass Blinde, welche gezwungen sind das Augenlicht durch den Tastsinn zu ersetzen, merklich kleinere Empfindungskreise haben als andere Menschen, und es kann wol nicht zweifelhaft sein, dass sie sich diese Eigenschaft durch Uebung erworben haben.

Solche Thatsachen sprechen deutlich dafür, dass die Fähigkeit der Haut, den Abstand zweier Punkte zu merken, eigentlich eine Fähigkeit des Gehirns ist. Durch Uebung lernt das Gehirn zwei nahe Punkte auf der Haut voneinander zu unterscheiden, weil es zu dem Bewusstsein gelangt, dass zwischen diesen zwei gereizten Punkten noch eine Zahl ungereizter Punkte liegt. Je grösser dieselbe ist, desto deutlicher ist das Bewusstsein von der Existenz dieser Punkte, und es gibt eine Grenze, bei welcher dieselben nicht mehr zahlreich genug sind, um zum Bewusstsein zu gelangen. Aber durch Uebung kann diese Grenze noch verkleinert werden, d. h. es sind dann weniger ungereizte Punkte zwischen den gereizten nöthig, um den Eindruck der doppelten Empfindung hervorzurufen. Da nun bei diesem Vorgange in der Haut die Anordnung der Nervenbahnen dieselbe geblieben ist, Uebung aber nichts anderes ist als ein Lernen, so geht daraus klar hervor, dass wir es hier mit einem Process im Gehirn zu thun haben, und dass die Empfindungskreise der Haut eigentlich nicht in der Haut, sondern im Gehirn sitzen.

Eine sehr interessante Täuschung des Tastsinnes, welche dem Leser gewiss schon als Spielerei bekannt

ist, liefert nicht minder den Beweis für die gegebenen Anschauungen. Es ist ein Versuch, den schon Aristoteles psychologisch betrachtet hat. Wenn man den Mittelfinger und Zeigefinger kreuzt (Fig. 6) und eine auf dem Tische liegende Erbse mit den gekreuzten Fingern betastet, so hat man die lebhafte Empfindung als ob man zwei Erbsen fasse. Selbst wenn man genau zusieht und sich überzeugt, dass nur eine Erbse vorhanden ist, kann man sich dieses Eindrucks kaum erwehren. Namentlich aber ist die Täuschung äusserst stark, wenn man die Erbse zwischen den Fingern hin- und herrollt.



*Fig. 6.*

Was ist nun die Ursache dieser sonderbaren Täuschung? Offenbar liegt sie darin, dass wir die tastenden Hautflächen in eine ungewohnte Lage gebracht haben. Würden wir die Erbse mit dem Zeigefinger und Mittelfinger in ihrer gewöhnlichen Lage fassen, so würden wir aus Erfahrung wissen, dass wir es nur mit einer Erbse zu thun haben. Kreuzen wir aber die Finger, so lässt uns die Erfahrung nicht allein im Stich, sondern sie täuscht uns sogar über das, was die Empfindung hervorruft.

Die Ursache der Täuschung ist in der That eine vom Gehirn bereits gemachte Erfahrung, welche sich ihm durch Uebung eingeprägt hat und die uns in einem solchen Falle in die Irre führt. Wenn wir nämlich die Finger kreuzen, so bringen wir die äussern Ränder der beiden Finger gleichzeitig mit der Erbse in Berührung. Diese beiden Ränder sind aber bei der gewohnten Haltung der Finger immer einander abgewendet, und wenn daher in dieser Haltung die Ränder gleichzeitig berührt werden, so weiss das Gehirn aus Erfahrung, dass dies nur durch zwei getrennte Gegenstände geschehen kann.

Nun bleibt diese Erfahrung für das Gehirn unter allen Umständen massgebend, mag man die Finger in eine Lage bringen, welche man wolle. Kreuzen wir die Finger und berühren mit ihnen ein Kügelchen, so bleibt für den durch Erfahrung ausgebildeten Tastsinn des Gehirns die Lage der Finger trotzdem die natürliche, und wir verwandeln daher in unserer Vorstellung die gekreuzte Lage in die gewöhnliche. Geschieht dies, so muss in unserer Vorstellung sich das eine Kügelchen auch in zwei verwandeln.

Wir ersehen hieraus, wie fest das Bild unserer Körperoberfläche dem Gehirn eingeprägt ist. Es kennt ganz genau die natürliche Lage aller Körpertheile und den Ort jedes Hautpunktes, eine Kenntniss, die es sich durch langjährige Uebung und Erfahrung erworben hat. Aber ausserdem ist es auch im Stande eine grosse Zahl von Bewegungen der Körpertheile genau abzuschätzen. Indem wir unsere Hand über einen Gegenstand hinführen, bringen wir sie in mannichfache Lage zu unserm Körper, und doch gewinnen wir dabei durch Tasten ein richtiges Bild des Gegenstandes, weil wir aus Erfahrung die Stellung der Hand mit in Rechnung ziehen. Von allen diesen Stellungen und Bewegungen unserer tastenden Gliedmassen können wir uns aber nur dann vollkommen Rechenschaft geben, wenn eine genügende Uebung und Erfahrung stattgefunden hat. Sobald wir aber die Gliedmassen in eine ungewohnte Lage bringen, über welche wir keine eingelernte Erfahrung besitzen, so hört auch das richtige Urtheil über ihre Tastempfindung auf und wir vermögen dann nicht die gefühlten Gegenstände im Raume richtig zu localisiren.

---

## Drittes Kapitel.

### Der Drucksinn der Haut. — Das Temperaturgefühl.

Die Haut besitzt nicht nur die Eigenschaft, die Berührung eines Körpers an und für sich zu fühlen, sondern sie hat auch das Vermögen den Druck abzuschätzen, unter welchem die Berührung stattfindet.

Wenn wir ein Gewicht auf die frei ausgestreckte Hand legen, so sind wir im Stande, die Schwere desselben zu schätzen, und wir pflegen es dabei mehrmals zu heben und zu senken, bis uns der Werth des Gewichts genügend bekannt ist.

Unser Urtheil gründet sich hier hauptsächlich auf diejenige Anstrengung, welche die Muskeln des Armes beim Heben aufzuwenden haben, und da wir von dieser Thätigkeit der Muskeln eine deutliche Empfindung haben und diese Empfindung zunimmt, wenn die Thätigkeit der Muskeln wächst, so sind wir auch im Stande, hierdurch verschiedene Gewichte voneinander zu unterscheiden. Aber bei einem solchen Versuche wirkt das auf die Hand gelegte Gewicht nicht nur durch seinen Zug gegen diejenigen Muskeln, welche es zu tragen streben, sondern es übt auch gleichzeitig auf die Haut einen Druck aus, den wir neben der Muskelanstrengung mitempfinden. Wir haben es also hier mit zwei Einwirkungen zu thun, die sich fast immer zusammengesellen, wenn wir auf irgendeine Weise einen Gegenstand in die Höhe heben, die wir aber wissenschaftlich voneinandertrennen und einzeln betrachten müssen. Heben wir z. B. ein auf dem Boden stehendes Gewicht an einem Ringe mit senkrecht herabhängendem Arme auf, so wirkt dasselbe durch Druck gegen diejenigen Hautstellen der Hand, welche den Ring fassen und durch Zug gegen diejenigen Muskeln, welche beim Heben thätig sind. Der Zug gegen die Muskeln wird bei ein und demselben Gewicht immer derselbe bleiben,

aber die Einwirkung des Druckes auf die hebende Hand kann verschiedenartig sein, je nach der Form der Handhabe, an der wir angreifen. Nehmen wir einen sehr breiten Ring als Handhabe, so wird sich der Druck des Gewichts auf einen sehr grossen Theil der Handfläche vertheilen, und jeder einzelne Punkt der Haut wird nur einen mässigen Druck erfahren; nehmen wir aber einen sehr schmalen Ring hierzu, so concentrirt sich der ganze Druck auf eine kleine Hautstelle und wir haben dann an derselben eine bei weitem stärkere Druckempfindung, die sogar schmerzhaft werden kann.

Unser Urtheil über die Schwere eines Gewichts wird nun durch beide gleichzeitig auftretenden Empfindungen geleitet, und man unterscheidet wissenschaftlich zwei verschiedene Fähigkeiten, welche diesen Empfindungen entsprechen. Man unterscheidet die Fähigkeit, den Grad der Muskelthätigkeit zu empfinden, den Muskelsinn und die Fähigkeit, die Grösse des Druckes auf die Haut abzuschätzen, den Drucksinn der Haut.

Im gewöhnlichen Leben sind Muskelsinn und Drucksinn fast immer gleichzeitig thätig, wenn wir irgendeinen beliebigen Gegenstand heben, und daher kommt es, dass wir uns durch den einwirkenden Druck sehr häufig über die Schwere eines Körpers täuschen können. Denn wenn ein schwerer Körper mit einer schmalen Kante auf unserer Haut lastet, so wird er uns meist schwerer erscheinen, als wenn er mit breiter Fläche aufliegt, weil er die Haut stärker drückt. Mindestens werden wir dann sehr leicht ein unsicheres Urtheil über seine Schwere haben. Gewinnen wir aber aus andern Umständen ein sicheres Urtheil über seine Schwere, so pflegen wir zu sagen, dass der Körper allerdings gar nicht so schwer sei, als es uns dem Drucke nach schien, sondern dass er nur unbequem zu tragen sei.

Die Schwere eines Gewichts schätzen wir aber doch hauptsächlich mit Hülfe des Muskelsinnes, und der

Druck ist nur eine nebenhergehende Empfindung, welche auf unser Urtheil einen geringern Einfluss ausübt. Dies geht aus einigen sehr sinnreichen Versuchen von Ernst Heinrich Weber hervor, die wir anführen wollen. Derselbe ermittelte nämlich, welches der kleinste Gewichtsunterschied sei, den man durch Heben mit der Hand merken kann, und so fand er, dass sich höchstens 39 von 40 Loth noch unterscheiden liessen, aber $39\frac{1}{2}$ von 40 nicht mehr. Dieses Verhältniss von 39 zu 40 blieb bei allen Gewichten ungefähr dasselbe, d. h. es konnte $19\frac{1}{2}$ von 20 oder 78 von 80 u. s. w. unterschieden werden.

In diesen Versuchen combinirten sich nun Muskelsinn und Drucksinn und wirkten beide auf das Urtheil ein. Es lassen sich aber auch Versuche anstellen, in denen der Drucksinn ausschliesslich thätig ist und der Muskelsinn vollkommen ausgeschlossen ist. Wenn wir die Hand flach auf den Tisch legen und dieselbe mit Gewichten belasten, so sind wir auch im Stande, die Schwere des Gewichts nach dem empfundenen Drucke zu beurtheilen, ohne dass wir irgendeine Muskelanstrengung machen. Wir können also auch auf diese Weise verschiedene Gewichte voneinander unterscheiden, aber es stellt sich heraus, dass die Unterscheidung keine so genaue ist als die beim Heben der Gewichte. Wir sind dann nicht mehr im Stande 39 von 40 Loth zu unterscheiden, sondern höchstens 29 von 30 Loth.

Die Natur hat uns also mit zwei Hülfsmitteln ausgestattet, welche wir gleichsam als Wage für die Schwere eines Körpers benutzen können. Das eine von beiden, der Muskelsinn, ist die empfindlichere Wage, während das andere, der Drucksinn, bei weitem weniger empfindlich ist. In Wirklichkeit benutzen wir eben immer beide Mittel gleichzeitig, um die Schwere eines Gegenstandes zu erfahren.

Bei der eingehendern Untersuchung des Drucksinnes hat sich noch manches Interessante herausgestellt. Wenn man ermitteln will, welche zwei Gewichte man durch den Druck

voneinander zu unterscheiden vermag, so thut man am besten, die beiden Gewichte schnell hintereinander auf dieselbe Hautstelle, z. B. auf die Finger, die man auf dem Tische ausstreckt, aufzulegen. Weit schwerer wird uns die Unterscheidung, wenn wir zwei Gewichte gleichzeitig auf zwei verschiedene Finger legen, und es scheint daher, als ob unsere Aufmerksamkeit sich nicht gleichzeitig auf beide Hautstellen zu richten vermag. Aber wenn wir auch dieselbe Hautstelle wählen, ist unser Urtheil auch noch von der Zeit abhängig, welche zwischen beiden Prüfungen vergeht. Weber beobachtete, dass er bei grösster Aufmerksamkeit 29 Loth von 30 Loth unterscheiden könnte, wenn zwischen dem Auflegen beider Gewichte nicht mehr als 10 Secunden lagen. Dauert es aber länger, dann fangen die Angaben an unsicher zu werden, und man kann dann nur solche Gewichte voneinander unterscheiden, deren Verhältniss ein grösseres ist. Nach Verlauf von einer halben Minute konnte Weber z. B. nur noch vier von fünf Loth unterscheiden, oder 24 von 30 Loth.

Diese Versuche haben deshalb ein besonderes Interesse, weil in ihnen zu der Sinnesempfindung noch eine geistige Thätigkeit hinzutritt, welche wir allgemein mit dem Begriff Gedächtniss bezeichnen. Denn die Druckempfindung hört auf, sobald das drückende Gewicht abgenommen wird, aber unser Gehirn hat die Eigenschaft, den empfundenen Sinneseindruck noch eine Zeit lang festzuhalten, und wenn ein neuer Druck schnell auf den ersten folgt, so sind wir dann im Stande, die Stärke beider Empfindungen miteinander zu vergleichen. Aber der aufgenommene Sinneseindruck nimmt im Gedächtniss sehr schnell an Stärke ab, wie wir dies an dem angeführten Versuche deutlich erkennen können, und deshalb vermögen wir nicht mehr mit Sicherheit einen zweiten Eindruck vom ersten zu unterscheiden, wenn die Zeit zwischen beiden zu gross war.

Weber hat auch die Feinheit des Drucksinnes an

verschiedenen Theilen der Haut geprüft, und namentlich untersucht, ob die Druckempfindlichkeit mit der Tastempfindlichkeit in einer Beziehung stehe, d. h. ob der Drucksinn und der Ortssinn der Haut sich in gleicher Weise entwickelt zeige. Dies ist nun keineswegs der Fall. Denn der Drucksinn der Fingerspitzen ist nur um weniges feiner als der Drucksinn auf dem Unterarme, während der Ortssinn der Fingerspitzen neunmal schärfer ausgebildet ist. Einzelne Hautstellen, z. B. die Stirn- und die Bauchhaut haben einen ziemlich empfindlichen Drucksinn, während der Ortssinn keineswegs sehr ausgeprägt ist und die Bauchhaut nur einen stumpfen Ortssinn besitzt.

Beim Betasten eines Körpers fühlen wir nicht allein seine Form und nicht allein den Druck der Berührung, sondern wir empfinden auch gleichzeitig den Grad seiner Wärme. Im gewöhnlichen Leben pflegt man zu sagen, ein Körper sei kalt, warm oder heiss. Diese Bezeichnung ist eben eine rein subjective, denn sie richtet sich danach, welchen Eindruck die Temperatur des Körpers auf unsere Haut gemacht hat, und stimmt daher oft mit den Angaben des Thermometers nicht überein. Kalt nennen wir jeden Körper, welcher unserer Haut Wärme entzieht, warm jeden, der ihr Wärme zuführt, und da unsere Haut ungefähr 30—36° C. warm ist, so liegt der Nullpunkt unserer Temperaturempfindung ziemlich hoch.

In der Physik gibt es bekanntlich den Begriff der Kälte nicht, sie hat es nur mit einer einheitlichen Kraft der Wärme zu thun, die man als eine Schwingung der Körperatome betrachtet. Kälte ist etwas rein Subjectives und hängt nur von unserer Körpertemperatur ab. Die kaltblütigen Thiere müssen daher einen ganz andern Massstab für Kälteempfindung haben als die warmblütigen. Das Wärmegefühl dauert nur solange, als dem Körper an einer Hautstelle Wärme zugeführt wird; hat sich die Temperatur der Haut mit der des berührenden Gegenstandes ausgeglichen, so hört das

Wärmegefühl auf. Wenn wir unsere Hand, deren Haut meist etwas abgekühlt ist, in Wasser von 36° C. tauchen, so haben wir ein Wärmegefühl solange Wärme in die Hand einströmt. Je mehr sich diese aber selbst erwärmt, desto schwächer wird das Gefühl der Erwärmung. Tauchen wir dann die Hand in Wasser von 30° C., so kommt uns dieses im ersten Moment kalt vor, obgleich es doch einen mässigen Wärmegrad besitzt, weil nun Wärme in umgekehrter Richtung aus der Hand in das Wasser strömt. Ist dagegen die Hand vorher in der Luft abgekühlt, so wird uns Wasser von 30° C. recht angenehm warm erscheinen. Unsere Haut ist also nur ein relativer Wärmemesser, sie empfindet die absoluten Temperaturen nur in unvollkommenem Grade. Wenn wir ein Stück Metall und ein Stück Holz anfassen, die beide dieselbe Temperatur besitzen, so fühlt sich bekanntlich das Metall kälter an als das Holz, obgleich das Thermometer für beide dieselbe Angabe machen würde. Das Metall ist ein guter Wärmeleiter und entzieht der Haut sehr schnell die Wärme, während das Holz dies nur langsam thut. Die Geschwindigkeit aber, mit der der Wärmeverlust in unserer Haut stattfindet, ist namentlich von Einfluss auf die Stärke der Kälteempfindung.

Das Unterscheidungsvermögen der Haut für Temperaturen ist von Weber einer genauern Messung unterworfen worden. Man taucht z. B. die Hand oder einen Finger in Wasser von verschiedener Temperatur und prüft, welche Unterschiede derselben man zu merken im Stande ist. Weber fand, dass man mit dem Finger noch Differenzen von ein Fünftel Grad Réaumur herausfühlen kann, — eine ziemlich grosse Empfindlichkeit, die man kaum vermuthen sollte, da sie grösser ist als die unserer gewöhnlichen Thermometer. Dafür sind aber unsere Angaben über die absolute Temperatur sehr unsicher, denn es wird uns unmöglich sein, Wasser von 19° genau auf seine Temperatur zu schätzen, sondern wir werden nur angeben können, dass die Tem-

peratur zwischen 16—20° liegt. Die Feinheit des Temperatursinnes für Unterschiede, die wir schnell hintereinander fühlen, ist dagegen bei allen Temperaturen bis zur Blutwärme ziemlich gleich gross, an allen Körperstellen aber nicht dieselbe. Zunächst hängt sie von der Dicke der Haut ab, da durch die dünnere Haut die Wärme schneller eindringt. Daher ist der Handrücken empfindlicher als die Handfläche, und am empfindlichsten sind die Augenlider, die Lippen und die Zunge. Auch der Elnbogen erfreut sich einer grössern Empfindlichkeit, woher den Müttern, die ihre Kinder baden, das Eintauchen desselben als natürliches Thermometer wohl bekannt ist. Dies mag sich wol auch durch die dünnere fettlose Haut daselbst erklären.

Ausserdem müssen wir in der Haut besondere Temperaturorgane annehmen, die ihre eigenen Nerven haben, und die in einigen Hautstellen stärker entwickelt sind als in andern. Denn es ist bewiesen worden, dass die Nervenstämme selbst nicht die Eigenschaft haben Wärmegefühl zu erzeugen, wenn sie direct erwärmt werden. Am Elnbogen nämlich läuft ein Empfindungsnerv dicht unter der Haut auf dem Knochen, der bei einem Stosse häufig arge Schmerzen verursacht. Wenn man nun den Elnbogen in etwas heisses Wasser taucht, so hat man das Wärmegefühl nur an der eingetauchten Stelle, nicht im ganzen Arme, obgleich der Nerv sich im Arme und in der Hand ausbreitet. Wol aber empfindet man ein dumpfes Schmerzgefühl im ganzen Arme, wenn das Wasser zu heiss ist. Es wird also der Nervenstamm hier durch die Hitze erregt, aber diese Erregung erzeugt nicht Wärmegefühl, sondern Schmerz. Wenn man den Elnbogen in eiskaltes Wasser taucht, ist dieses Schmerzgefühl ganz dasselbe, woraus hervorgeht, dass die Nervenstämme Wärme und Kälte nicht empfinden können. Die Schmerzempfindung, die in diesem Falle auftritt, ist wol auch ein Grund, weshalb der Elnbogen so empfindlich gegen übermässige schädliche Wärme ist.

Es ist also anzunehmen, dass die Nerven in der Haut besondere Temperaturorgane haben, welche geeignet sind durch Wärme eine Nervenerregung zu erzeugen. Solche Organe sind aber bis jetzt noch nicht entdeckt worden, wenigstens hat man keine als solche erkannt. Es wäre möglich, dass die Tastkörperchen ausser der Tastempfindung auch noch der Temperaturempfindung dienen, aber etwas Sicheres lässt sich darüber nicht aussagen. Weber hat die interessante Thatsache gefunden, dass warme Körper leichter erscheinen als kalte. Wenn man jemand bei geschlossenen Augen einen kalten Thaler auf die Stirn legt, und dann auf dieselbe Stelle zwei erwärmte Thaler, so wird er sie für gleich schwer halten, während er die kalten Gewichte sehr wohl voneinander unterscheidet. Ein Zusammenhang zwischen Wärme- und Tastgefühl scheint also zu existiren, aber derselbe ist wissenschaftlich noch nicht ermittelt.

---

# ZWEITER ABSCHNITT.

## Der Gesichtssinn.

---

### Erstes Kapitel.

Bau des Auges. — Brechung der Lichtstrahlen in einer Linse. — Gang der Lichtstrahlen im Auge.

Während wir mit Hülfe des Tastsinnes von dem Vorhandensein der Körper nur dann Kenntniss erhalten, wenn wir unsere Hautoberfläche in directe Berührung mit den Körpern bringen, sind wir im Stande, durch das Auge die Körper in grosser Entfernung wahrzunehmen vermöge einer Kraft, welche wir das Licht nennen. Fast scheint es, als ob im Raume der Fortpflanzung dieser Kraft keine Grenze gesetzt sei. Aus den fernsten Sphären des Weltalls, die wir niemals ermessen werden, senden uns die Gestirne Lichtstrahlen zu, welche uns ihre Gegenwart verkünden. Ja wir sind sogar jetzt im Stande, mit Hülfe der Spectralanalyse auf ihre chemische Zusammensetzung zu schliessen. Soweit aber der Lichtstrahl im Raume dringt, vermag er, solange er noch eine gewisse Kraft besitzt, eine Einwirkung auf unsern Gesichtssinn auszuüben, und dieser eröffnet uns dadurch ein Erkenntnissbereich, dessen Grenzen weit über diejenigen hinausragen, welche das Reich der andern Sinne einschliessen.

Die Physik lehrt uns, dass das Licht durch den Lichtäther, einen Stoff von ausserordentlicher Feinheit fortgepflanzt wird, welcher durch den ganzen Weltraum verbreitet ist, welcher alle Körper durchdringt und auch im ganz leeren Raume noch vorhanden ist, und dass es aus Schwingungen des Aethers von ausserordentlicher Schnelligkeit besteht. Indem diese in das Innere des Auges durch seine durchsichtigen Organe eindringen, erzeugen sie in uns eine Lichtempfindung, und vermöge des wunderbaren Baues, dessen das Auge sich erfreut, sind wir nicht nur fähig, das Licht, welches die Körper aussenden, als solches zu empfinden, sondern auch die Gestalt, Grösse und Beschaffenheit der Körper wahrzunehmen.

Wenden wir uns zunächst dazu, die wichtigsten Theile unseres Auges kennen zu lernen.

In der beistehenden Fig. 7 ist nach den Angaben von Helmholtz ein horizontaler Querdurchschnitt durch das rechte Auge abgebildet, welcher uns alle wesentlichen Theile dieses von der Natur mit bewundernswerther Feinheit gebauten Organes erläutern soll. Wir sehen hier den Augapfel umgeben von einer derben Haut *m n*, welche man die weisse Sehnenhaut nennt, und die beim Lebenden an ihrem vordern Abschnitt zwischen den Augenlidern als das sogenannte Weisse des Auges zum Vorschein kommt. Die Haut ist ziemlich dick und fest, gewährt dem Auge hinreichenden Schutz gegen Angriffe von aussen, ist nicht durchsichtig, wol aber für starkes Licht durchscheinend. An ihrem vordern Rande geht sie direct in die Hornhaut *h h* über, die fast ebenso dick ist, aber sich durch ihre vollkommen glasartige Durchsichtigkeit unterscheidet. Dieselbe wölbt sich wie ein Uhrglas stärker nach vorn und bildet gleichsam die durchsichtige Decke des Auges, durch welche das Licht in das Innere einfällt.

Nun folgt nach innen auf die Sehnenhaut eine bei weitem dünnere, zartere, tief schwarz gefärbte Haut *g*, welche man die Aderhaut nennt, weil sie eine grosse

Menge von Blutadern enthält. Ihre schwarze Farbe aber stammt her von einer reichlichen Menge von schwarzen Pigmentzellen, welche auf ihrer Innenfläche mosaikartig aufsitzen. Diese Haut hängt continuirlich zusammen mit der **Regenbogenhaut** *p p*, welche an jedem lebenden Auge sichtbar ist, und in ihrer Mitte

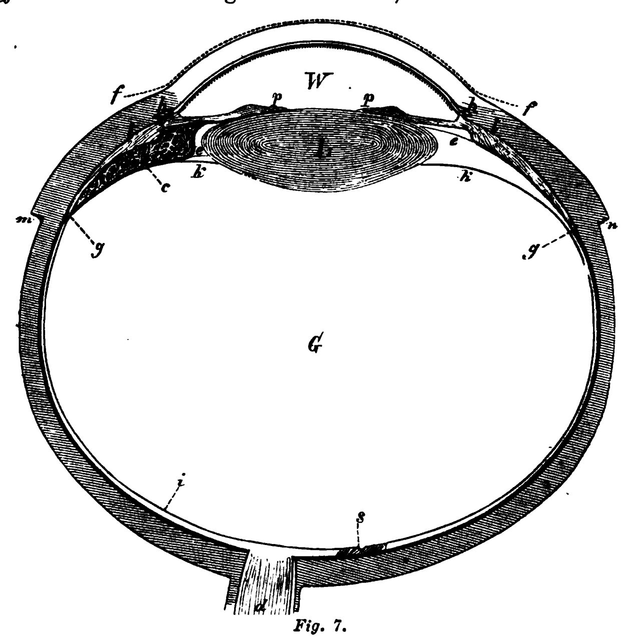



*Fig. 7.*

eine dunkle Oeffnung, die **Pupille**, einschliesst. Durch diese Oeffnung fällt das Licht in das Innere des Augapfels ein und gelangt bis an die hintere Wand desselben. Die schwarze Färbung der Aderhaut ist von einem sehr wesentlichen Nutzen im sehenden Auge. Wäre sie nicht vorhanden, so würde das Licht, das auf den Hintergrund des Auges auffällt, wie von einer jeden hellen Fläche wieder zurückgeworfen werden,

eine Unmasse von Lichtstrahlen würden sich im Auge unregelmässig zerstreuen, und dadurch sowol blendend auf dasselbe einwirken, als auch namentlich die Deutlichkeit der Bilder im Auge ausserordentlich beeinträchtigen. Auch die Regenbogenhaut ist mit demselben schwarzen Pigment ausgestattet wie die Aderhaut, und nimmt je nach der Menge des Pigments eine hellere oder dunklere Färbung an. In den blauen Augen hat die Regenbogenhaut nur an ihrer hintern Fläche eine dünne Schicht von Pigment, welche blau hindurchschimmert. Je stärker die Pigmentirung ist, desto dunkler erscheint das Auge, und so entstehen die verschiedenartigen Nuancen, welche die Augen darbieten, vom dunkelsten Braun bis zum hellsten Blau oder Grau. Unter allen Menschenrassen gibt es Individuen, denen das Pigment nicht nur im Auge, sondern überhaupt am ganzen Körper, in den Haaren und in der Haut fehlt, und welche man Albino oder Kakerlaken nennt. Im Auge erzeugt dieser Mangel an Pigment eine merkbare Beeinträchtigung des Sehactes; die Regenbogenhaut erscheint weisslichroth, die Pupille sieht meist hellroth aus und die blendende Einwirkung des Tageslichts verursacht ein Zusammenkneifen der Augenlider, welches den mangelnden Schutz des Pigments ersetzen soll. Auch unter Thieren findet man häufig Albino, z. B. die weissen Kaninchen, an deren Augen sich interessante Beobachtungen mancherlei Art anstellen lassen. So sieht man z. B. an einem frischen ausgeschnittenen Auge eines solchen Thieres sehr deutlich ein zierliches umgekehrtes Bildchen der Gegenstände, welches sich auf der hintern Wand abmalt und durch die hellen Augenhäute klar durchleuchtet, während es an den dunkel gefärbten Augen anderer Thiere nicht zu bemerken ist.

Nun legt sich innen an die Aderhaut eine zarte Haut an, welche die Netzhaut heisst (Fig. 7, *i*). Sie bildet die Fortsetzung und Ausbreitung des Sehnerven, der wie der Stiel eines Apfels in die hintere Wand

des Auges etwas schief von der Nasenseite her eindringt, die Sehnen- und Aderhaut durchbohrt und dann nach allen Seiten hin mit seinen Fasern ausstrahlt, um sich hier, mit eigenthümlichen Endigungen versehen, in eine Art Nerventapete aufzulösen, welche das feinste Sinneswerkzeug ist, das die Natur geschaffen hat. Die Netzhaut reicht mit ihrem Rande nach vorn bis gegen den äussern Umfang der Regenbogenhaut und liegt ganz frei gegen das durchsichtige Innere des Auges, sodass die einfallenden Lichtstrahlen zunächst auf sie treffen und in ihr einen Lichteindruck erzeugen. Bevor aber die Strahlen bis zu ihr hindringen, durchwandern sie eine Anzahl durchsichtiger Gebilde, welche in dem kugelförmigen Hohlraum des Auges liegen, und hier ähnlich wie in den Röhren eines Mikroskopes oder Fernrohres kunstvoll aneinander gepasst sind, nur mit dem Unterschiede, dass sie dicht aneinander stossen und keine Spur Luft sich zwischen ihnen befindet. Die äussere Hülle dieser durchsichtigen Körper bildet die Hornhaut, von der wir schon gesprochen haben, und es folgen dann nach innen erstens die wässerige Flüssigkeit *W*, zweitens die Krystalllinse *L* und drittens der Glaskörper *G*. Die wässerige Flüssigkeit füllt, wie man sieht, den Raum zwischen der Hornhaut, der Regenbogenhaut und der Linse aus. Nun liegt dicht hinter der Regenbogenhaut die in ihrer Form wohlbekannte Augenlinse *L*, die wie ein recht dickes Brennglas aussieht. Sie ist an ihrer hintern Fläche stärker gewölbt als an ihrer vordern, im frischen lebenden Auge ist sie ganz krystallklar und besteht aus einer ziemlich weichen, nach innen immer härter werdenden Masse. Man hat gefunden, dass ihre Substanz nicht ganz gleichförmig ist, sondern dass sie aus feinen Fasern besteht, die in gewundenen Linien angeordnet sind und der Linse dadurch einen meist sechsstrahligen Bau verleihen. Es liegt aber die Linse nicht etwa lose hinter der Regenbogenhaut, sondern ist in einer durchsichtigen Kapsel gelagert, die selbst wieder

durch eine straffe eigenthümliche Haut *k k*, *e e*, von der wir noch später sprechen werden, an ihrem Rande festgehalten wird. Hier nur so viel, dass diese Haut sich nach hinten kugelförmig in die Glashaut fortsetzt, welche sich dicht an die Netzhaut anlegt. Der kugelförmige Hohlraum zwischen Linse und Netzhaut ist von dem Glaskörper, einer klaren gallertartigen Masse ausgefüllt, die von der Glashaut dicht umschlossen ist.

Die in das Auge einfallenden Lichtstrahlen durchlaufen also die Hornhaut, die wässerige Flüssigkeit, die Krystalllinse und den Glaskörper, um zur Netzhaut zu gelangen, und auf diesem Wege erfahren sie in den Augenmedien eine derartige Brechung, dass sie sich zu deutlichen Bildern auf dem Hintergrunde des Auges vereinigen.

Sehr bekannt ist es, dass man mit Hülfe einer Glaslinse im Stande ist, Bilder der Gegenstände auf einem Schirme zu entwerfen. Wenn wir z. B. aus einem Operngucker die vordere convex gewölbte Linse herausnehmen, sie in einem Zimmer dem Fenster gegenüber in der Hand halten, und ein Stück Papier als Schirm dahinter anbringen, so erscheint ein kleines umgekehrtes Bild des Fensters darauf, welches bei einer bestimmten Entfernung des Schirmes scharf und deutlich ist. Bekannt ist ferner die Camera obscura, die in ihrer einfachsten Gestalt aus einem Kasten besteht, an dessen einer Fläche eine Oeffnung mit einer Convexlinse angebracht, und dessen gegenüberliegende Fläche aus einem durchscheinenden Papier oder einer matt geschliffenen Glasplatte gebildet ist, auf welcher das entstehende Bild aufgefangen wird. In der That gleicht das Auge in seiner Wirkung einer solchen Camera obscura, die bekanntlich zur Erzeugung photographischer Bilder benutzt wird, ist aber, wie wir sehen werden, in vieler Beziehung weit vollkommener als diese.

Auf welche Weise eine Convexlinse im Stande ist

das Bild eines Gegenstandes zu entwerfen, sehen wir in Fig. 8 durch Construction dargestellt. Der Pfeil *A B* bezeichne einen Gegenstand in einiger Entfernung von der Linse. In *F* und *F'* befinden sich die Brennpunkte der Linse, deren Entfernung man leicht dadurch findet, dass man Sonnenstrahlen auffängt und den Vereinigungspunkt auf einem Schirme sucht, der bei starken grössern Gläsern sehr hell und heiss ist. In dem Brennpunkte vereinigen sich alle Strahlen, welche parallel und senkrecht auf die Linse auffallen. und umgekehrt wenn Strahlen aus dem Brennpunkte auf die Linse auffallen, so gehen sie in paralleler Richtung aus der Linse heraus. Der oberste Punkt *B* des Gegenstandes sendet nun unter andern einen Strahl

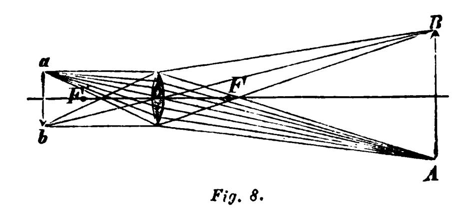



*Fig. 8.*

zur Linse, welcher durch den Mittelpunkt *O* der Linse hindurchgeht. Dieser Strahl erleidet keine Brechung, weil sich die Linse gegen ihn so verhält, als wäre sie eine von parallelen Flächen begrenzte Scheibe. Ein zweiter Strahl geht durch den Brennpunkt *F*, trifft die Linse und geht dann auf der andern Seite in einer Linie weiter, die parallel mit der Linie *F' O F* ist, welche man die optische Axe nennt. Beide Strahlen treffen sich im Punkte *b* und hier bildet sich also die Spitze des Pfeiles ab. Nach ganz derselben Construction, die man in der Figur verfolgen kann, bildet sich der Fuss des Pfeiles in *a* ab, und so erscheint also von einem Gegenstande ein umgekehrtes Bild, das um so kleiner ist, je weiter der Gegenstand entfernt ist, und welches sich bei unendlicher Entfernung des Gegen-

standes, z. B. bei der Sonne, in einen Punkt, den Brennpunkt, vereinigt.

Fig. 9 zeigt eine Camera obscura in der Form, wie sie von den Photographen benutzt wird. In der Messinghülse *h i* befindet sich die Linse, *g* ist die matte Glasscheibe, auf welcher das Bild entsteht, und der Kasten *a b* besteht aus zwei Theilen, die aus- und eingeschoben werden können, um den Ort des Bildes für Gegenstände in verschiedener Entfernung aufsuchen zu können. Ausserdem ist an der Messinghülse eine Schraube *r* angebracht, welche es gestattet, die Linse selbst vor- und rückwärts zu schieben, und dadurch das Bild auf der Scheibe recht scharf einzustellen. Wir werden

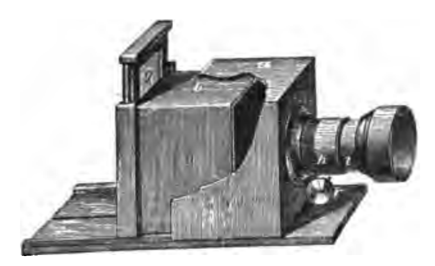


*Fig. 9.*

sehen, dass auch das Auge eine Einrichtung besitzt, die denselben Zweck erfüllt, recht scharfe Bilder zu erzeugen, dass aber dieser Zweck auf einem ganz andern Wege erreicht wird.

Die Brechung der Lichtstrahlen im Auge ist viel complicirter als die in einer einfachen Convexlinse, denn im Auge durchwandert der Lichtstrahl mehrere Substanzen hintereinander und an der Grenze je zweier findet eine Lichtbrechung statt. Die Gesammtwirkung aber, welche alle brechenden Medien des Auges ausüben, ist der einer einzigen Convexlinse vollkommen gleich, und es entsteht ein umgekehrtes Bildchen der äussern Gegenstände auf der Netzhaut, welches man,

wie schon berichtet, am ausgeschnittenen Auge eines weissen Kaninchens deutlich hindurchschimmern sieht. Hauptsächlich sind es drei Flächen, an denen die Lichtbrechung stattfindet, erstens die äussere Fläche der Hornhaut, zweitens die vordere, drittens die hintere Fläche der Linse. An der Oberfläche des Auges findet die stärkste Brechung statt, weil hier der Lichtstrahl aus einem sehr dünnen Medium, der Luft, in ein dichtes Medium, die Hornhaut und wässerige Feuchtigkeit übergeht, welche beide ungefähr dasselbe Brechungsvermögen besitzen. Die Linse besitzt ein stärkeres Brechungsvermögen als die wässerige Flüssigkeit und der Glaskörper, und durch sie werden die eingetretenen Lichtstrahlen noch stärker gesammelt. Ihre Wirkung wird noch durch den eigenthümlichen Umstand erhöht, dass dieselbe aus concentrischen Schichten besteht, von denen die innere immer stärker bricht als die äussere. Man hat berechnet, dass dadurch ein grösserer Effect erzielt wird, als wenn die ganze Linse aus einer gleichförmig brechenden Masse bestände, die das Brechungsvermögen des Linsenkernes besässe.

Man sieht nun leicht ein, dass die Entstehung des Bildes im Auge doch eine etwas andere ist als in der Camera obscura. In letzterer haben wir es nur mit einem brechenden Körper zu thun, auf dessen beiden Seiten sich Luft befindet. Beim Auge dagegen fällt der Lichtstrahl aus Luft in eine Anzahl von brechenden Substanzen ein, ohne wieder in die Luft überzugehen, vielmehr entsteht das Bild hier an der hintern Grenze des Glaskörpers, auf der Netzhaut. Die Brechung und Construction für den Gang der Lichtstrahlen ist deswegen eine viel complicirtere als bei einer Glaslinse, aber dennoch lässt sich annähernd auf einfache Weise der Lauf der Strahlen im Auge verfolgen.

An einer Convexlinse (Fig. 8) zeichnet sich, wie wir gesehen haben, der Mittelpunkt dadurch aus, dass alle Strahlen, die durch ihn hindurchgehen, nicht gebrochen

werden. Man nennt deshalb diesen Punkt in optischer Beziehung auch Knotenpunkt, und in einer Convexlinse, deren beide Flächen gleich stark gewölbt sind, fällt dieser Punkt mit dem geometrischen Mittelpunkte zusammen. Anders verhält sich die Sache in einer Linse mit ungleich gewölbten Flächen, und noch complicirter wird das Verhältniss in einem System von brechenden Medien, wie wir es im Auge vor uns haben. Die mathematische Berechnung, welche von Listing angestellt worden ist, hat ergeben, dass es auch für ein solches System einen Punkt gibt, durch welchen die Strahlen annähernd ungebrochen hindurchgehen; und dieser Punkt, den man Knotenpunkt des Auges nennt, liegt innerhalb der Linse, aber nicht in ihrem

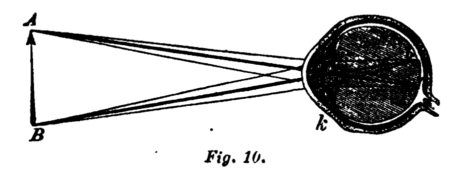



*Fig. 10.*

Mittelpunkte, sondern zwischen diesem und ihrer hintern Fläche. Zieht man von einem leuchtenden Punkte nach diesem Punkte einen Strahl, so geht er ungebrochen bis zur Netzhaut hin, aber genau genommen erleidet er auch eine geringe Brechung, die man aber für die Wirklichkeit vernachlässigen kann. In Fig. 10 ist $k$ der Knotenpunkt des Auges; es sei $AB$ ein Gegenstand, so geht ein Strahl $Aka$ ungebrochen bis zur Netzhaut und ebenso der Strahl $Bkb$. Nun ist die Grösse des Auges im Verhältniss zu den brechenden Medien so abgemessen, dass innerhalb der Sehgrenzen das Bild der Gegenstände ungefähr in der Entfernung der Netzhaut entsteht, und ausserdem besitzt das Auge die Eigenschaft, sich für verschiedene Entfernungen genau einzustellen. Wenn das Auge daher für den Gegenstand $AB$ eingestellt ist, so vereinigen sich alle

Strahlen, welche von $A$ kommen, im Punkte $a$ auf der Netzhaut und alle Strahlen, welche von $B$ kommen, vereinigen sich in $b$, und so entsteht ein umgekehrtes Bildchen $a\,b$ auf der Netzhaut. Man erkennt aus der Figur, dass alle Strahlen, welche nicht durch den Knotenpunkt hindurchgehen, in gesetzmässiger Weise gebrochen werden, sodass sie sich zu Bildern auf der Netzhaut wieder sammeln.*

Wenn wir nach einem sehr weit entfernten Punkte blicken, z. B. nach einem Sterne, so kommen die Strahlen parallel in das Auge, und da sie sich auf der Netzhaut wieder zu einem Punkte vereinigen, so geht daraus hervor, dass in diesem Falle der Brennpunkt der Augenmedien gerade in die Netzhaut fällt. So wunderbar genau ist also der Bau des Auges ausgeführt, dass die Form der brechenden Flächen und das Brechungsvermögen der Augenmedien gerade zur Entfernung der Netzhaut von der vordern Fläche der Hornhaut stimmt. Freilich ist dies nur beim normalen Auge der Fall, nicht beim kurzsichtigen oder weitsichtigen Auge, die, wie wir sehen werden, sich anders verhalten.

So entstehen Bilder aller Gegenstände auf der Netzhaut des Auges. Eine wichtige Rolle spielt hierbei noch die Regenbogenhaut, weil durch ihre Anwesenheit die Deutlichkeit der Bilder erhöht wird. Sie dient nämlich im Auge als Blende, indem sie den Rand der Linse verdeckt und dadurch die Randstrahlen derselben abhält, welche bei jeder Linse das Bild undeutlich machen, weil ihr Brennpunkt von dem der mittlern

* Wenn man den Gang eines Strahles im Auge genau construiren will, so muss man zwei durch Rechnung gefundene Knotenpunkte annehmen, von dem leuchtenden Punkte eine Linie nach dem ersten Knotenpunkte ziehen und vom zweiten eine damit parallele nach der Netzhaut. Diese beiden Knotenpunkte liegen einander sehr nahe und können für die Praxis in einen vereinigt werden.

Theile der Linse etwas abweicht. Eine solche Blende wird zu gleichem Zwecke in allen optischen Apparaten, in Fernröhren, Mikroskopen und in der Camera obscura angebracht, denn ohne sie erscheinen die Bilder mit unscharfen Rändern. Die Regenbogenhaut ist aber eine Blende von so vollkommener Art, wie wir sie in unsern Instrumenten nicht herstellen können. Sie hält nicht nur die schädlichen Randstrahlen ab, sondern sie regulirt auch die Menge des Lichts, welches dem Auge zuträglich und nothwendig ist. Wenden wir das Auge auf einen hellen Gegenstand, nach dem Himmel oder in eine Flamme, so verengert sich die Pupille, und blicken wir in das Dunkle, so erweitert sich die Pupille beträchtlich. Sehr schön beobachtet man die Verengerung der Pupille, wenn man eine Person an ein helles Fenster stellt, das Auge mit der Hand verdeckt und diese dann plötzlich fortnimmt. In der Dämmerung sind die Pupillen bedeutend weiter als am hellen Tage. Auf diese Weise wird die Menge des einfallenden Lichtes regulirt, denn je kleiner die Pupille ist, desto kleiner ist die Strahlenmenge, die von einem Punkte aus einfällt, je weiter die Pupille, desto grösser ist diese. Die Nachtthiere, z. B. Eule, Uhu, zeichnen sich durch sehr weite Pupillen aus, wodurch sie im Stande sind, in der Dunkelheit gut zu sehen, während sie das Tageslicht scheuen, weil sie davon geblendet werden.

Gehen wir nun noch einmal auf den Vergleich des Auges mit der Camera obscura zurück, so fällt uns noch ein besonderer Vorzug des Auges auf, den dasselbe vor jener voraus hat. Er besteht darin, dass die Hinterwand des Auges kugelförmig gewölbt ist, während in der Camera die matte Scheibe, welche das Bild auffängt, eben ist. Dadurch erhält aber das Auge zwei wesentliche Vortheile, die jedem leicht auffallen werden, der einmal das Bild einer Camera betrachtet hat.

Das Bild, welches eine Convexlinse von einem grössern geradlinigen Körper, z. B. von dem Pfeil Fig. 8 ent-

wirft, ist nämlich nicht genau geradlinig, sondern kreisförmig gebogen, und man kann diese Krümmung annähernd construiren, wenn man um den Mittelpunkt der Linse in der Entfernung des Bildes einen Kreis zieht. Denkt man sich das ganze Gesichtsfeld von einer Linse abgebildet, so liegt das Bild der Linse nicht in einer Ebene hinter derselben, sondern annähernd auf einer Kugelfläche, deren Mittelpunkt in der Linse liegt. Daher kommt es, dass das Bild einer Camera obscura in seinen seitlichen Partien keine genau geraden Linien zeigt, sondern mehr oder weniger gebogene Linien. Sehr deutlich erkennt man dies auf Photographien, wenn z. B. die senkrechte Kante eines Hauses in grösserer Dimension darauf abgebildet ist. Dieser Fehler ist nicht sehr gross, wenn das Bild in der Nähe der optischen Axe ($FF'$) gelegen ist, sobald aber die Bilder sich zu weit von ihr entfernen, so werden sie verzerrt und undeutlich. Aus diesem Grunde ist der Grösse eines photographischen Bildes eine Grenze gesetzt, und es gelingt immer nur einen kleinen Theil des Gesichtsfeldes abzubilden. Anders verhält sich das Auge. Dasselbe besitzt eine kugelförmige Hinterwand, auf der das Gesichtsfeld sich abmalt, sodass die kugelförmige Bildfläche gerade mit jener zusammenfällt. So ist also jener Fehler der Camera obscura beim Auge vollständig vermieden; denn das Auge ist im Stande ein grösseres Gesichtsfeld in sich aufzunehmen, in welchem auch die seitlichen Theile sich deutlich und nicht verzerrt abbilden. Bestände die Netzhaut aus einer ebenen Wand, wie die matte Scheibe einer Camera, so müsste sie sehr viel grösser sein als sie in Wirklichkeit ist, wenn wir damit ebenso viel sehen wollten, und ausserdem würde nur der mittlere Theil des Gesichtsfeldes ein gutes klares Bild geben.

---

## Zweites Kapitel.

### Die Accommodation des Auges. — Kurzsichtigkeit und Weitsichtigkeit.

Aus der Erfahrung wissen wir, dass wir im Stande sind, Gegenstände in verschiedener Entfernung von unserm Auge deutlich zu sehen. Wenn wir aber genau darauf achten, so merken wir, dass es nicht möglich ist, von zwei Gegenständen in verschiedener Entfernung von uns zu gleicher Zeit ein deutliches Bild zu haben. Befinden wir uns im Zimmer in einiger Entfernung dem Fenster gegenüber, halten vor das eine Auge, während wir das andere zudrücken, einen Finger einige Zoll weit empor und fassen diesen scharf ins Auge, sodass wir ihn deutlich sehen, dann erscheint uns das dahinterliegende Fensterkreuz in undeutlichen Umrissen. Wenn wir nun unsere Aufmerksamkeit auf das Fensterkreuz richten und es scharf erkennen, so werden die Umrisse des Fingers undeutlich werden, und so können wir willkürlich einmal den Finger und dann wieder das Fensterkreuz deutlich sehen. Auf diese Weise accommodirt sich das Auge den Gegenständen in verschiedener Entfernung; und man nennt diese Eigenschaft desselben die Accommodation. Während wir beim Sehen das Auge auf nahe und entfernte Gegenstände schweifen lassen, findet in ihm fortdauernd die Thätigkeit der Accommodation statt, ohne dass wir davon ein Bewusstsein haben.

In Fig. 8 bildet sich der Pfeil $AB$ in $ab$ ab. Rückt nun das Object $AB$ in grössere Entfernung, so nähert sich das Bild $ab$ dem Brennpunkte $F'$, indem es gleichzeitig kleiner wird. Der Ort des Bildes ist ein wechselnder, je nach der Entfernung des Gegenstandes. Wenn daher in der Camera obscura ein Bild eingestellt werden soll, so muss man den innern Kasten $b$ mit der matten Scheibe $g$ für ferne Gegenstände in den erstern $a$ hineinschieben, für nahe Gegenstände

muss man ihn weiter hinausschieben. Durch die Schraube $r$ kann man ferner die Linse ein wenig hin- und herschieben und das Bild noch schärfer einstellen. Was nun für eine Linse gilt, das gilt auch für das Auge. Der Gegenstand $AB$ in Fig. 10 möge sich im Auge scharf in $ab$ abbilden. Entfernt oder nähert man den Gegenstand, während das Auge in demselben Zustande bleibt, so muss das Bild des Gegenstandes undeutlich werden, weil es im erstern Falle vor der Netzhaut, im letztern Falle hinter der Netzhaut entsteht. Denken wir uns in gewissem Abstande vom Auge einen leuchtenden Punkt $a$ Fig. 11, so wird dieser Punkt ein scharfes Bild geben, wenn die Netzhaut im Vereinigungspunkte $c$ liegt; befände sich aber die Netzhaut

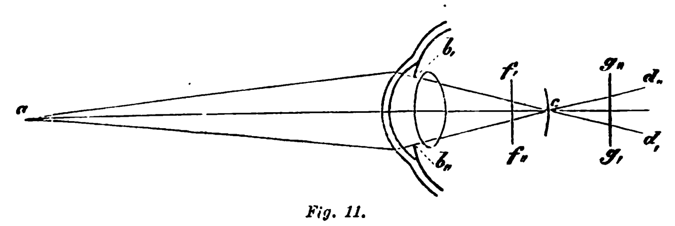



*Fig. 11.*

in $g_, g_{,,}$, sodass der Punkt sich vor derselben abbildet, so entsteht auf $g_, g_{,,}$ kein Punkt, sondern ein Kreis, welchen man Zerstreuungskreis nennt. Ebenso entstände ein Zerstreuungskreis auf der Netzhaut, wenn dieselbe sich in $f_, f_{,,}$, also vor dem Bilde befände, und wenn alle Punkte eines Körpers sich in Zerstreuungskreisen auf der Netzhaut abzeichnen, so werden die Umrisse undeutlich und verschwommen werden. So erklärt sich nun der Versuch, von welchem wir vorhin ausgegangen sind. Betrachten wir den Finger und das Fensterkreuz hintereinander, so geben alle Punkte des Fensterkreuzes Zerstreuungskreise, sobald wir den Finger scharf betrachten, und umgekehrt erscheint der Finger durch Zerstreuungskreise undeutlich, wenn das Fensterkreuz ein scharfes Bild in unserm Auge gibt. Das Bild,

welches wir scharf sehen befindet sich immer auf der Netzhaut, das andere undeutlichere liegt im ersten Falle vor im letztern Falle hinter der Netzhaut. Es geht aber hieraus unmittelbar hervor, dass das Auge ein Einstellungsvermögen besitzt, wodurch die Gegenstände aus verschiedenster Entfernung immer scharf auf die Netzhaut geworfen werden.

Man könnte vermuthen, dass die Einrichtung dieser Einstellung im Auge eine ähnliche sei, wie in der Camera obscura. Man hat es auch früher für möglich gehalten, dass bei der Accommodation die Netzhaut nach vorn und hinten rücke, indem sich der Augapfel durch den Druck der Muskeln in der Augenhöhle verlängere, sodass gleichsam die Hinterwand des Auges aus- und eingeschoben würde. Diese Annahme ist aber widerlegt worden, und es ist gezeigt worden, dass im Auge die Einrichtung eine ganz andere ist als in der Camera, eine so vollkommene, wie sie künstlich gar nicht nachgeahmt werden kann. Denken wir uns, das Auge sei auf eine sehr grosse Entfernung eingestellt, indem wir einen Punkt am Horizont oder am Himmel betrachten. Es fallen dann von diesem Punkte die Strahlen fast parallel in das Auge, werden also in dem Brennpunkte des Auges vereinigt, welcher beim normalen Auge gerade im Mittelpunkte der Netzhaut liegt. Wenn nun der betrachtete Punkt in die Nähe des Auges rückt, so wird das Bild desselben nach den Gesetzen der Optik über den Brennpunkt hinaus hinter die Netzhaut fallen. Nun aber ist das Auge im Stande durch die Accommodation dennoch den Bildpunkt wieder auf die Netzhaut zu werfen, und daraus geht unmittelbar hervor, dass in diesem Falle die in das Auge einfallenden Strahlen stärker gesammelt, d. h. stärker gebrochen werden müssen, damit sie sich früher vereinigen, als es bei schwächerer Brechung möglich wäre, und wiederum auf der Netzhaut ein deutliches Bild geben.

Wodurch entsteht nun beim Sehen in die Nähe eine

stärkere Brechung der Lichtstrahlen im Auge? Man hat direct im Auge beobachtet, dass wenn dasselbe aus dem Fernsehen in das Nahesehen übergeht, die Augenlinse dicker wird indem sich ihre vordere Fläche stärker wölbt. In Fig. 12 sehen wir die Veränderung der Linse, welche diese bei der Accommodation für die Nähe erleidet, nach einer Darstellung von Helmholtz abgebildet. Die linke Hälfte der Figur zeigt die Linse bei der Accommodation für die Ferne, die rechte Hälfte ihre Gestalt bei der Accommodation für die Nähe. Hierbei wird die vordere Fläche stärker gekrümmt und nach vorn geschoben, sodass sie die Regenbogenhaut mitnimmt und der Hornhaut nähert.

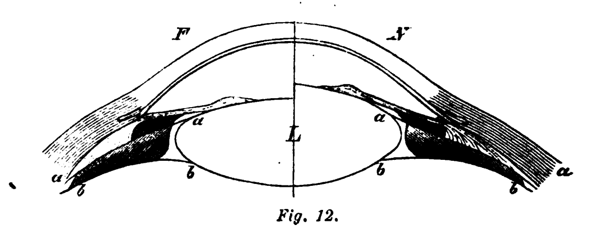



*Fig. 12.*

Dieses Vordrängen der Regenbogenhaut kann man leicht beobachten, wenn man das Auge einer Person seitlich betrachtet, während es den Blick von einem fernen auf einen nahen Gegenstand wandern lässt.

Erklärt sich denn aber nun die stärkere Brechung der Strahlen beim Nahesehen aus der beschriebenen Bewegung der Linse? Allerdings! Nach den Gesetzen der Optik bricht eine Convexlinse um so stärker das Licht, je stärker gekrümmt ihre Flächen sind. Von zwei gleichgrossen Linsen, von denen die eine flach und dünn, die andere stark gewölbt und dick ist, besitzt die erstere eine grössere die letztere eine kleinere Brennweite d. h. die letztere sammelt oder bricht das Licht stärker. Dasselbe geschieht auch in der Linse des Auges bei der Accommodation. Betrachten wir einen Gegenstand in der Nähe, so krümmt sich die

Linse stärker als beim Fernsehen, und ihre Brechung verstärkt sich derart, dass das Bild auf die Netzhaut rückt. Natürlich wird die Wölbung der Linse eine verschiedene sein, je nach der Entfernung des Gegenstandes, den das Auge betrachtet, und zwar wird sie mit der Annäherung desselben zunehmen. Beim Sehen treten diese Aenderungen an der Linse mit derselben Schnelligkeit ein, mit der wir den Blick da und dorthin wenden, und sie sind durch die Uebung so genau einstudirt, dass wir sofort von jedem Gegenstande ein scharfes Bild auf die Netzhaut entwerfen.

Nun müssen wir uns weiter die Frage vorlegen, durch welchen Mechanismus die Formveränderung der Linse erzeugt wird. Dies geschieht durch einen Muskel, den wir in Fig. 7 gezeichnet sehen. Er befindet sich in *t*, da wo die Aderhaut in die Regenbogenhaut übergeht. Er setzt sich mit seinen Fasern nicht direct an die Linse an, sondern hat einen etwas complicirten Bau, und seine Wirkung auf die Accommodation ist daher längere Zeit unklar gewesen. Helmholtz hat seine Wirkung auf folgende Weise erklärt. Die Linse ist mit ihrem Rande (Fig. 7) an ein Band befestigt, das Strahlenband, welches strahlenförmig nach aussen geht und dieLinse straff gespannt erhält (in der Figur durch die Linie *e* angedeutet). Da wo dieses Band sich aussen an die Häute des Auges ansetzt, setzen sich auch die Fasern des Accommodationsmuskels* an. Beim Sehen in die Ferne ist dieser Muskel erschlafft, das Strahlenband dehnt durch seine elastische Spannung die Linse in radialer Richtung nach dem Rande hin aus, wodurch die Dicke der Linse kleiner und ihre Wölbung flacher werden muss. Beim Accommodiren für die Nähe wird das Strahlenband durch den Muskel nach Innen näher an den Rand der Linse hinge-

* Musculus tensor chorioideae, Aderhautspanner, genannt, weil er den Rand der Aderhaut nach vorn zieht.

zogen, seine Spannung muss infolge dessen nachlassen, und die Linse zieht sich vermöge ihrer Elasticität zusammen, indem sie dicker wird und sich an ihrer vordern Fläche stärker wölbt. Das Sehen in die Ferne ist also mit keiner Muskelanstrengung verknüpft, es halten sich dabei nur die elastischen Spannungen der Linse und des Strahlenbandes das Gleichgewicht. Beim Nahesehen dagegen findet eine Muskelanstrengung im Auge statt, und daher ist auch das Sehen in die Nähe anstrengend für das Auge, während beim Sehen in die Ferne das Auge ausruht.

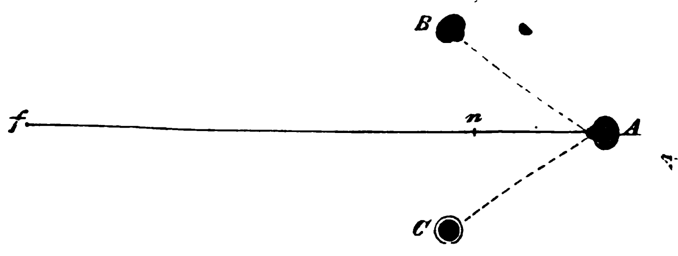



*Fig. 13.*

Noch haben wir die Frage unbeantwortet gelassen, wodurch man die Verdickung der Krystalllinse beim Sehen in die Nähe erkannt hat. Das Vorschieben der Regenbogenhaut, das damit verbunden ist, ist allerdings ziemlich leicht zu sehen, und zugleich beobachtet man dabei eine Verengerung der Pupille. Aber dadurch wäre die stärkere Vorwölbung der Linse noch nicht streng bewiesen. Ganz sicher lässt sich dieser Vorgang vielmehr erst aus der Beobachtung von Reflexbildern erschliessen, welche das Auge zurückspiegelt.

Die Spiegelbilder, welche das Auge von allen Gegenständen gibt, sind jedem Laien wohlbekannt. Diese deutlich wahrnehmbaren Bilder entstehen an der vordern Fläche der Hornhaut und erscheinen als kleine aufrechte etwas verzerrte Bildchen, ganz ebenso wie

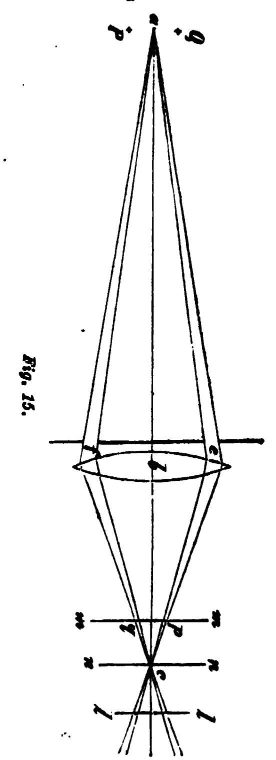
sie von einer spiegelnden Kugel, die man häufig in Gärten sieht, erzeugt werden. Wir haben es hier mit der Wirkung eines Convexspiegels zu thun. Bei schärferer Beobachtung sieht man aber auch von der vordern und hintern Fläche der Linse Reflexbilder entstehen, die freilich weit schwächer sind als die Hornhautbilder. Um sie zu bemerken muss man den Versuch in einem ganz dunkeln Zimmer machen. Man stellt (Fig. 13) neben das beobachtete Auge *A* eine Lichtflamme *C*. Das Auge des Beobachters befindet sich in *B*, während das Auge A in der Richtung nach *f* blickt. *B* erblickt dann drei Spiegelbilder in *A*, wie sie in Fig. 14 gezeichnet sind. Auf dem dunkeln Hintergrunde der Pupille erscheint zuerst das helle Hornhautbild *a*, dann ein ebenfalls aufrechtes etwas grösseres aber viel lichtschwächeres Bildchen *b* von der vordern Linsenfläche, und drittens ein kleineres etwas schärferes und umgekehrtes Bildchen *c* von der hintern Linsenfläche. Das letztere ist desshalb umgekehrt, weil es von einem Concavspiegel entworfen wird, während die beiden ersten von Convexspiegeln erzeugt werden.



*Fig. 14.*

Nun beobachtet man ferner eine deutliche Veränderung an dem Bildchen *b* von der vordern Linsenfläche, sobald der Blick von einem entfernten Punkte *f* auf einen nahen Punkt *n* übergeht und umgekehrt. Beim Accommodiren für die Nähe wird das Bild kleiner und schärfer, beim Accommodiren für die Ferne wird es grösser und verschwommener. Daraus geht aber nach optischen Gesetzen mit Sicherheit hervor, dass beim Nahesehen die Krümmung der Linsenfläche zunehmen muss, denn je gewölbter ein Convexspiegel ist, desto kleiner ist das Bild, welches er zurückwirft. Die beiden andern Bilder *a* und *c* bleiben dagegen beim Accommodiren unverändert; woraus folgt, dass die Hornhaut und die hintere Linsenfläche dieselbe Krümmung beibehalten

Wenn wir einen Gegenstand dem Auge näher rücken und uns bestreben denselben deutlich zu sehen, z. B. die Buchstaben beim Lesen, so gibt es eine Grenze, bei der wir auch bei aller Anstrengung nicht mehr scharf zu sehen vermögen. Man nennt diesen Punkt den Nahepunkt des Auges, der ungefähr 4—5 Zoll weit entfernt ist. Durch einen sehr interessanten, den Scheiner'schen, Versuch lässt sich die Entfernung dieses Punktes für jedes Auge genau ermitteln.


Fig. 15.

Man nehme ein Kartenblatt und bringe darin mit einer Nadel zwei feine Oeffnungen an, welche ungefähr zwei Millimeter voneinander entfernt sind. Hält man nun die Oeffnungen dicht an das Auge und die Nadel hinter die Oeffnungen, so sieht man zwei Nadeln nebeneinander, wenn diese dem Kartenblatt sehr nahe ist. Entfernt man die Nadel allmählich, so kommt ein Punkt, an dem die beiden Bilder sich zu einem vereinigen, und dieser Punkt ist der Nahepunkt des Auges.

Diese Erscheinung wird aus nebenstehender Fig. 15 klar werden. Das Auge ist durch die Linse *b* ersetzt, davor befindet sich ein Schirm, der die beiden Oeffnungen *e* und *f* hat. Der leuchtende Punkt *a* sendet zwei Strahlenbündel durch diese Oeffnungen zur Linse, welche sich in *c* zu einem Bilde vereinigen, woselbst

der Schirm *n n* die Netzhaut darstellt. Befindet sich aber die Netzhaut in der Entfernung von *m m*, so entstehen in *p* und *q* zwei Bilder des Punktes *a*, die weniger scharf sind als das Bild in *c*. Dies ist nun der Fall in dem obigen Versuche, sobald die Nadel den Oeffnungen so nahe ist, dass die beiden Strahlenbündel sich bis zur Netzhaut noch nicht vereinigt haben. Das Auge vermag dann auch bei grösster Anstrengung die Brechung der Linse nicht so stark zu vermehren, um auf die Nadel zu accommodiren. Sucht man den Punkt auf, an dem es aber gelingt ein Bild zu sehen, so ist dieser offenbar der Nahepunkt.

Interessant ist es ferner noch, dass wenn man zwei Bilder *p* und *q* wahrnimmt, das Bild *q*, welches durch die untere Oeffnung *f* entsteht, oben erscheint, ungefähr in *Q*, und das Bild *p* unten ungefähr in *P* erscheint. Denn verdeckt man die Oeffnung *f*, so verschwindet *Q*, verdeckt man *e*, so verschwindet *P*. Der Grund ist ein einfacher. Unser Netzhautbild ist, wie wir wissen, ein umgekehrtes. Was also auf der Netzhaut sich unten abbildet, das befindet sich im Gesichtsfeld oben, was rechts befindet sich links und umgekehrt. Also verlegen wir in unserer Vorstellung das Netzhautbildchen *q* oben hin nach *Q*, und das Bildchen *p* unten hin nach *P*.

Zum Gelingen des Versuches ist es noch wichtig zu beachten, dass die Entfernung der beiden Oeffnungen nicht grösser sein darf als der Durchmesser der Pupille, da sonst nicht beide Strahlen zugleich eindringen können. Auf dem Princip dieses Versuches beruht das Optometer, an welchem durch Verschiebung zweier Röhren ineinander, ähnlich einem Fernrohr, der Nahepunkt genau gefunden wird.

Nun gibt es auch für die meisten Augen beim Accommodiren in die Ferne eine Grenze, an welcher das scharfe deutliche Sehen aufhört. Ganz normale scharfsichtige Augen sehen allerdings die Gegenstände in beliebiger Entfernung bis zum Horizont von ganz

scharfen Rändern umgeben, sie vermögen also auf die grösste Entfernung zu accommodiren. Sehr viele Augen aber vermögen dies nicht, d. h. sie sind mehr oder weniger kurzsichtig, und es gibt für sie eine Entfernung, in der scharfes Sehen aufhört. Diesen Punkt nennt man den Fernpunkt des Auges.

Das normalsichtige Auge hat seinen Fernpunkt in der Unendlichkeit. Wenn von einem leuchtenden Punkt in unendlicher Entfernung z. B. von einem Sterne parallele Strahlen in das Auge fallen, so werden sie im Brennpunkte des Auges vereinigt, und dieser soll bei einem solchen Auge genau in der Netzhaut liegen. Dass aber diese ideale Forderung nur selten erfüllt ist, geht daraus hervor, dass die Menschen einen Stern strahlig abbilden, obgleich er nur ein leuchtender Punkt ist. Beim kurzsichtigen Auge liegt der Brennpunkt mehr oder weniger vor der Netzhaut innerhalb des Glaskörpers, und das kommt daher, dass der Augapfel im Verhältniss zur Brechkraft seiner durchsichtigen Medien besonders der Linse in seinem Durchmesser von vorn nach hinten zu lang ist. Wird diesem Auge ein leuchtender Punkt aus grosser Entfernung genähert, so rückt nach optischen Gesetzen das Bild aus dem Brennpunkt näher an die Netzhaut heran, aber es erreicht dieselbe erst bei einer gewissen Grenze der Annäherung, und für sehr kurzsichtige Augen ist die Entfernung bekanntlich erheblich klein, sodass sie nicht einmal im Stande sind, innerhalb eines Zimmers deutliche scharfe Bilder zu erkennen. Der Fernpunkt dieser Augen ist dann derjenige Punkt, dessen Bild gerade die Netzhaut berührt, während alle entferntern Punkte Zerstreuungskreise geben müssen.

Kurzsichtige bedienen sich einer Brille aus Concavgläsern um deutlich in die Ferne zu sehen. Diese Gläser haben die Eigenschaft, die Lichtstrahlen zu zerstreuen, sodass convergirende Strahlen, welche auf dieselben auffallen, sich erst in grösserer Entfernung zu einem Bilde vereinigen. Fig. 16 zeigt, dass Strahlen,

welche nach dem Punkte *B* convergiren, durch ein Convexglas nach dem Punkte *A* hin geworfen werden. Denken wir uns, dass in einem kurzsichtigen Auge das Bild eines leuchtenden Punktes in *B* sich abbilde, dass aber die Netzhaut dahinter in *A* sich befinde, so wird das Aufsetzen einer Concavbrille das Bild auf die Netzhaut werfen. Je kurzsichtiger das Auge ist, desto concaver müssen die Brillengläser sein, weil sie die einfallenden Strahlen um so mehr zerstreuen müssen, damit ihre Bilder in die Netzhaut fallen.

Ein anderer häufig vorkommender Fehler des Auges ist die Weitsichtigkeit. Dieser Zustand ist dem vorigen entgegengesetzt und besteht darin, dass der Brennpunkt des Auges hinter die Netzhaut fällt. Wenn also parallele Strahlen, z. B. von einem Stern, in das Auge einfallen, so vereinigen sie sich erst hinter der

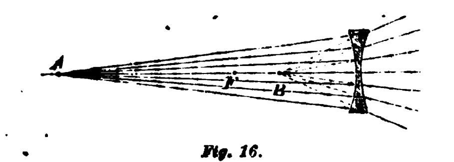


Fig. 16.

Netzhaut, aber es gelingt meistens diesen Augen durch Accommodation die Bilder weiter nach vorn zu rücken und auf diese Weise Gegenstände in der Ferne deutlich zu sehen. In der Nähe aber sehen diese Augen undeutlich, weil hier die Accommodation nicht mehr ausreicht, die Bilder bis zur Netzhaut zu bringen, und der Nahepunkt ist daher ziemlich weit vom Auge entfernt. Der Weitsichtige bedient sich deshalb, um in der Nähe deutlich zu erkennen, einer Convexbrille, denn eine Convexlinse sammelt die Strahlen, vereinigt sie früher und rückt daher die Bilder weiter nach vorn. Wenn ein Weitsichtiger lesen will, so muss er sich die Brille aufsetzen oder er hält das Buch recht weit von sich ab bis er seinen Nahepunkt erreicht hat, während

umgekehrt ein Kurzsichtiger ganz gut ohne Brille lesen kann, wenn er das Buch dem Auge nur nahe genug hält. Kurzsichtige sehen sogar Gegenstände, die sie dicht an das Auge bringen, besser als Normalsichtige, weil ihr Nahepunkt dem Auge näher liegt und weil mit der Annäherung an das Auge die scheinbare Grösse der Gegenstände wächst.

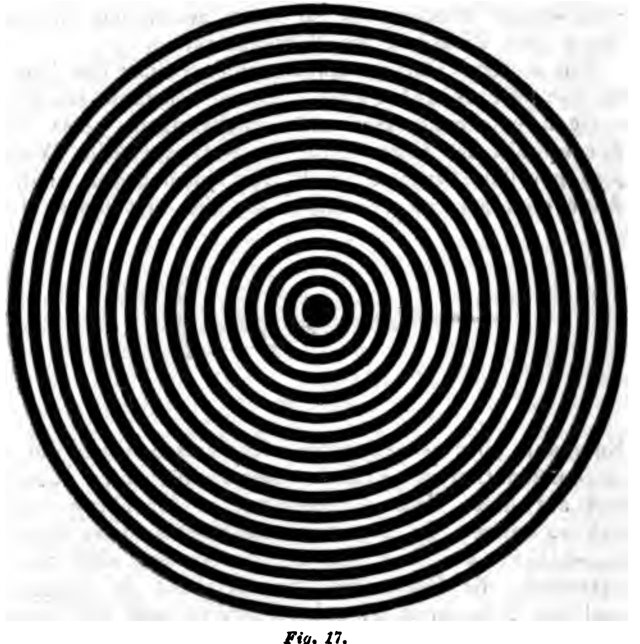


*Fig. 17.*

Ein anderer weniger auffallender Fehler des Auges, der bei normalen Augen nur in geringem Masse vorhanden, aber krankhafter Weise oft stärker ausgeprägt ist, besteht darin, dass das Auge um seine Längenaxe von vorn nach hinten nicht ganz symmetrisch gebaut ist. Wenn wir

die concentrischen Kreise Fig. 17 mit einem Auge betrachten, so erscheinen uns niemals alle Linien zu gleicher Zeit deutlich, sondern es springen, je nachdem wir accommodiren, immer zwei gegenüberliegende Sectoren scharf und deutlich heraus, deren Lage wechselt. Das kommt daher, dass die Krümmungen der brechenden Flächen im Auge in der horizontalen und verticalen Richtung nicht ganz gleich sind. Es haben folglich Strahlen, die in einer verticalen Ebene liegen, einen andern Brennpunkt oder Vereinigungspunkt als Strahlen, die in horizontaler Ebene liegend einfallen. Wenn wir demnach z. B. auf horizontale Linien accommodiren, so sehen wir verticale Linien, die sich in gleicher Entfernung befinden, nicht deutlich und umgekehrt. Dies ist in der Figur der concentrischen Kreise der Fall, da hier horizontale und verticale Richtung der Linien ineinander übergeht.

Noch einen Umstand wollen wir erwähnen, der bei der Lichtbrechung im Auge eine Rolle spielt. Es ist bekannt, dass schlechte Operngläser oder Fernröhre die Gegenstände mit farbigen Rändern zeigen, und um diesen Fehler zu vermeiden, wendet man sog. achromatische Linsen an, die so zusammengesetzt sind, dass die Zerstreuung des Lichtes in Farben aufgehoben wird. Eine jede einfache Linse gibt Bilder mit farbigen Rändern, weil die Vereinigungspunkte der farbigen Strahlen, aus denen das weisse Licht besteht, nicht zusammenfallen, sondern die Brechung der Spectralfarben von Roth bis zum Blau zunimmt. Man sieht daher eine rothe und blaue Linie nebeneinander nicht zu gleicher Zeit scharf, denn wenn man auf die rothe accommodirt, liegt die blaue vor der Netzhaut und wenn man auf die blaue accommodirt, liegt die rothe Linie hinter der Netzhaut. Nun ist aber auch das Auge kein ganz achromatisches Instrument, obgleich die farbigen Ränder der Gegenstände beim gewöhnlichen Sehen verschwinden. Man betrachte den scharfen Rand eines dunkeln Gegenstandes gegen eine weisse Fläche

oder den bewölkten Himmel, z. B. den horizontalen Balken des Fensterkreuzes, so erscheint der obere Rand gelblich, der untere Rand bläulich gefärbt, besonders wenn man nicht scharf darauf accommodirt. Hier kommen die farbigen Strahlen, ebenso wie in op-

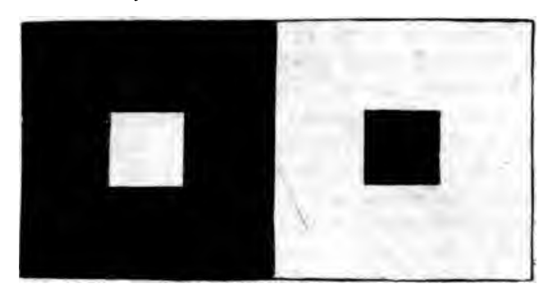


*Fig. 18.*

tischen Instrumenten, desshalb zum Vorschein, weil sich ihre Zerstreuungskreise am Rande nicht mehr decken, während innerhalb einer weissen Fläche dieselben übereinander fallen und wieder weisses Licht geben.

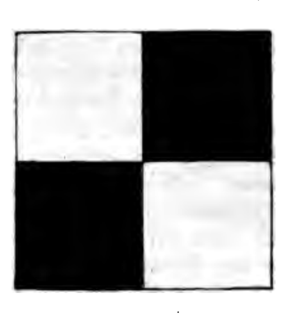


*Fig. 19.*

Durch mangelhafte Accommodation in gewisser Entfernung vom Auge entstehen an den Rändern heller Flächen auf dunkelm Grunde Zerstreuungskreise, wodurch die hellen Flächen etwas vergrössert aussehen. Man nennt diese Erscheinung I r r a d i a t i o n. Betrachten wir z. B. in Fig. 18 die beiden gleichen Quadrate, das schwarze auf hellem und das helle auf dunklem Grunde, so erscheint das letztere in einiger Entfernung vom Auge viel grösser als das erstere. In Fig. 19 scheinen die beiden weissen Quadrate von Weiten gesehen in ein-

ander zu fliessen, durch eine weisse Brücke mit einander verbunden zu sein, indem die Zerstreuungskreise hier ineinander übergreifen. Bekannt ist es, dass Personen in heller Kleidung voller aussehen als in schwarzer Kleidung, was sich auch durch die Wirkung der Irradiation erklärt. Dieser Umstand ist in der Toilettenkunst nicht unbekannt, und wird sorgfältig berücksichtigt. Dass schwarze Kleidung schlank macht, wissen die Damen sehr wohl.

---

## Drittes Kapitel.

### Wahrnehmung innerer Theile des Auges. — Der Augenspiegel.

Die Netzhaut des Auges bildet diejenige Grenze, an welcher der physikalische Vorgang des Sehens in den physiologischen Vorgang übergeht. Bis zur Netzhaut erleidet das eindringende Licht nur physikalische Veränderungen, die wesentlich in der Brechung desselben bestehen, und das letzte wahrnehmbare Resultat desselben ist die Entstehung des Netzhautbildchen. Von hier ab entzieht sich der Vorgang unserer unmittelbaren Beobachtung und es wird immer schwieriger in das Wesen desselben einzudringen.

Das Netzhautbildchen ist umgekehrt, und doch sehen wir alle Gegenstände im Gesichtsfelde aufrecht. Das ist das Resultat der Erfahrung, die wir von Kindheit an im Sinnenreiche des Sehens machen. Der Punkt *A* (Fig. 10), der rechts liegt, bildet sich in *a* auf der linken Netzhautfläche ab, und wir wissen daher aus Erfahrung, dass ein Strahl der von rechts kommt die linke Hälfte der Netzhaut treffen müsse; und indem wir alles Gesehene nach aussen hin verlegen, construiren wir unbewusst den Sehstrahl *a A* durch den Kno-

tenpunkt *K*. Auf diese Weise projicirt das Auge ein flächenhaftes Gesichtsfeld nach aussen hin, welches wir erhalten, wenn wir von jedem Punkte der Netzhaut durch den Knotenpunkt des Auges gerade Linien nach aussen ziehen, die auf einer Kugelfläche enden.

Das ist wirklich die Art, wie das Auge in allen Fällen seine Gesichtsempfindungen deutet. Denn es gibt Erscheinungen, in welchen wir keine äussern Gegenstände sondern Theile des Auges selbst oder innere Reizungen desselben wahrnehmen, und auch diese werden dann auf demselben Wege nach aussen hin verlegt.

Wenn wir das Auge schliessen und mit einem Stecknadelknopf den Augapfel an seinen äussersten Rändern ein wenig drücken, so sehen wir im dunkeln Felde einen kleinen hellen oder auch farbigen Lichtkreis, die Druckfigur, und zwar befindet sich dieselbe am linken Rande des Feldes, wenn wir rechts drücken, oben, wenn wir unten drücken und umgekehrt. Die Netzhaut reicht nämlich bis über den aus der Augenhöhle hervorragenden Abschnitt des Auges, und ist durch Druck reizbar. Bekannt ist es, dass man bei einem Schlag auf das Auge Funkensprühen sieht, eine Lichterscheinung, welche durch die mechanische Erschütterung der Netzhaut erzeugt wird. Diese zuweilen unfreiwillig wahrgenommene Erscheinung in eine wissenschaftliche Form verwandelt ist die Druckfigur, und zugleich beobachten wir an ihr, wie sich der Ort der Reizung zu dem Orte der Lichtempfindung verhält. Wir verlegen einen Punkt am linken Netzhautrande im Gesichtsfelde nach rechts, indem wir die Vorstellung haben, als sei von rechts her ein Strahl in das Auge eingefallen, der die Netzhaut links treffen muss.

Wir sind auch im Stande Körperchen im Innern des Auges wahrzunehmen, welche sich in den durchsichtigen Medien befinden. Sehr viele Augen bemerken schon beim gewöhnlichen Sehen runde Körperchen oder Fädchen, welche im Gesichtsfelde umherzuschwimmen scheinen und

„fliegende Mücken“ genannt werden. Deutlicher erkennt man sie, wenn man gegen eine helle Fläche, den bedeckten Himmel, oder in ein Mikroskop sieht. Sie bewegen sich mit, wenn sich das Auge bewegt, aber sie machen noch ausserdem eigne Bewegungen. Diese Körperchen bestehen aus Fäden und Zellen, welche sich zwischen der Glashaut und der Netzhaut befinden, und in dem engen Raume schwimmen. Sie werfen ihren Schatten direct auf die Netzhaut und diese entwirft ihrer Erfahrung gemäss die Wahrnehmung nach aussen.

Durch genauere Beobachtungen lässt sich auch zeigen, dass die brechenden Medien des Auges gar nicht absolut durchsichtig sind, und dass in ihnen Trübungen enthalten sind, welche ihren Schatten auf die Netzhaut werfen. Wenn man durch ein feines Loch in einem Kartenblatt in geringer Entfernung vom Auge nach dem hellen Himmel sieht, so erblickt man einen Zerstreuungskreis, welcher aber nicht gleichmässig aussieht, sondern Streifen und Flecken enthält. Diese rühren zum Theil von Trübungen her, welche im Glaskörper vorhanden sind, zum Theil von dem eigenthümlich strahligen Bau der Linse, den wir bereits erwähnt haben. Alle diese Erscheinungen nennt man entoptische, weil es sich dabei um die Wahrnehmung innerer Theile des Auges handelt. Sie entstehen dadurch, dass das von aussen kommende Licht einen Schatten derselben auf der Netzhaut erzeugt. Daher sieht man sie am besten, wenn ein isolirter Strahlenkegel z. B. durch eine feine Oeffnung ins Auge fällt, weil dann die entstehenden Schatten scharf sind, während sie beim gewöhnlichen Sehen sich verwischen, weil das Licht von allen Seiten einfällt.

Eine der interessantesten entoptischen Erscheinungen ist die von Purkinje entdeckte Aderfigur. Man stelle sich abends in einem dunkeln Zimmer einer dunkeln Wand gegenüber und bewege eine Kerzenflamme mit der Hand seitwärts an dem Auge hin und her, während man senkrecht gegen die Wand blickt. Nach einiger Uebung treten dann im dunkeln Raume Adergeflechte

auf, die sich baumförmig verzweigen, und unzweideutig von Blutgefässen im Innern des Auges herrühren. Das Gesichtsfeld nimmt einen röthlichen Schein an, von welchem sich die Adern als dunklere Schatten abheben. Der Stamm der Gefässe entspringt etwas nach Innen vom Centrum an der Stelle, wo der Sehnerv in das Auge eintritt und verzweigt sich von hier aus nach Art der Blutgefässe, woraus unzweifelhaft hervorgeht, dass wir in diesem Versuche die Blutgefässe der Netzhaut selbst wahrnehmen. Nur eine Stelle bleibt von Gefässen frei, und zwar das Centrum der Netzhaut, mit dem wir am schärfsten sehen. Wenn nun die Kerzenflamme hin- und herbewegt wird, so bewegt sich auch der Gefässbaum und zwar in derselben Richtung mit der Flamme.

Alle hierbei angestellten Beobachtungen führen zu dem Resultat, dass wir auf diese Weise die Netzhautgefässe in ihrem Schattenbilde betrachten. Dass diese Gefässe einen Schatten hinter sich werfen werden, ist klar, dass aber ihr Schatten noch zur Wahrnehmung gelangt, führt zu dem sehr wichtigen und interessanten Ergebniss, dass die lichtempfindlichen Elemente der Netzhaut noch hinter den Blutgefässen derselben liegen müssen. Die Fig. 20 macht durch eine Zeichnung klar, wie das Schattenbild eines Gefässes zu Stande kommt. Befindet sich die Flamme in *a*, so entsteht auf der Netzhaut ein Bild derselben in *b*. An dieser Stelle selbst kommen die Gefässe nicht zum Vorschein, weil die Beleuchtung zu grell ist. Aber das Netzhautbild *b* selbst dient als Lichtquelle, und wenn sich gegenüber in *v* ein Gefäss befindet, so entsteht ein Schatten desselben in *c*. Was nun die Netzhaut im Punkt *c* wahrnimmt, das verlegt sie nach aussen durch den Knotenpunkt *k*

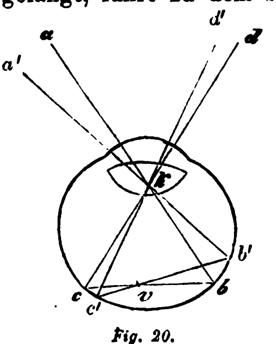


Fig. 20.

nach *d*, wo im Gesichtsfelde das Gefäss erscheint. Bewegt man die Lichtflamme von *a* nach *a'*, so rückt das Bild *b* nach *b'*, der Schatten *c* nach *c'* und das Gefässbild *d* nach *d'*, macht also dieselbe Bewegung wie die Flamme. — Warum nehmen wir aber beim gewöhnlichen Sehen die Netzhautgefässe nicht wahr? Weil in diesem Falle kein scharfer Schatten derselben entsteht, da von allen Punkten der Pupille aus Licht auf die Netzhaut fällt. In dem beschriebenen Versuche dagegen geht das Licht von einem Punkt *b* aus, und erzeugt schärfere Schatten. Ausserdem aber ist die Beleuchtung eine ungewöhnliche und wirft die Schatten auf Stellen, die nicht daran gewöhnt sind. Das scheint ebenfalls von Belang zu sein, denn wenn man die Flamme ganz still hält, so erblasst die Figur, weil die beschatteten Netzhautstellen sich in ihrer Empfindlichkeit abstumpfen, und sie kommt wieder zum Vorschein, wenn man die Flamme hin- und herbewegt und so den Ort des Schattens wechselt.

Durch die Pupille fällt eine ziemliche Menge Licht in das Auge hinein, das dazu hinreicht uns die ganze Aussenwelt erkennbar zu machen, aber von diesem Lichte scheint nichts wieder nach aussen zurückzukehren. Für gewöhnlich erscheint uns die Pupille des Auges dunkel, sodass wir nicht im Stande sind in das Innere des Auges weiter hineinzublicken als bis zur Regenbogenhaut. — Wäre es nicht möglich, das Auge derart zu erleuchten, dass man die Netzhaut in allen ihren Theilen erblickt? Diese Frage ist von dem berühmten Naturforscher Helmholtz in glücklicher Weise durch die Erfindung des Augenspiegels gelöst worden. Bevor wir diesen Apparat und seine Anwendung beschreiben, müssen wir auf die Thatsache eingehen, dass die Pupille gewöhnlich dunkel aussieht.

Die Lichtmenge, welche von dem Hintergrunde des Auges zurückgeworfen wird, kann, wie es sich von selbst ergibt, nicht sehr gross sein; denn nur die Netzhaut kann Licht reflectiren, und da diese sehr durchsichtig

ist, und hinter ihr gleich eine schwarze Pigmentschicht kommt, welche alles durchgedrungene Licht absorbirt, so wird die Reflexion nur eine schwache sein. Nun wissen wir ferner, wie schwer es ist, durch die Fenster von der Strasse her in ein Zimmer hereinzusehen. Das kommt daher, weil die zum Fenster herauskommende Lichtmenge sehr schwach ist im Verhältniss zu der Lichtmenge, welche von aussen her in unser Auge fällt, sodass dieses gegen erstere nicht empfindlich genug ist; ausserdem aber wirkt der Reflex der Fensterscheiben sehr störend gegen die Wahrnehmung der Gegenstände im Innern des Zimmers. Ist dagegen des Nachts das Zimmer erleuchtet, so sieht man von aussen sehr deutlich in das Innere hinein, obgleich die Beleuchtung im Innern bei weitem nicht so stark ist als am Tage.

Dieselben Umstände spielen nun auch beim Auge eine gewisse Rolle, aber es kommt noch ein wesentlicher Umstand hinzu, welcher das Hineinsehen in das Innere erschwert. Dies gilt ebenso für eine Camera obscura, durch deren Linse man auch nicht den Hintergrund, selbst wenn er weiss ist, erblicken kann. Nach den Gesetzen der Brechung haben nämlich im Auge oder in einer Camera nicht nur die eintretenden, sondern auch die austretenden Strahlen einen vorgeschriebenen Gang, während das Licht, welches aus einem Zimmer durch das Fenster nach aussen strömt, diffus ist, d. h. nach allen Seiten hin Strahlen sendet Denken wir uns, dass von einer Flamme ein Bild auf der Netzhaut entworfen sei, so können wir dieses Bild für die brechenden Medien des Auges wiederum als ein Object betrachten, von welchem die Strahlen den umgekehrten Weg nach aussen nehmen. Dieser Weg ist nun aber genau derselbe, auf welchem sie hineingekommen sind, denn wenn von einer Linse das Bild eines Objects entworfen wird, und wir an die Stelle des Bildes ein ihm gleiches Object setzten, so würde ein Bild entstehen, welches dem ersten Ob-

ject an Lage und Grösse vollkommen gleich wäre. Hieraus ersehen wir also, dass die Lichtstrahlen, welche ein Netzhautbildchen nach aussen sendet, gerade wieder zu dem Objecte zurückkehren müssen, von welchem sie ausgegangen sind.

Stellen wir demnach ein Licht vor das Auge, das wir betrachten wollen, so wird dieses Auge die Strahlen wieder in das Licht zurückwerfen, und wir sind nicht im Stande von diesen Strahlen etwas in unserm Auge aufzufangen, weil wir das Licht verdecken würden, wenn wir uns zwischen dieses und das beobachtete Auge stellten. Mit Hülfe einer durchsichtigen Glasplatte gelingt es aber, wie es Fig. 21 zeigt, dieses Hinderniss zu überwinden und das Auge erleuchtet zu sehen. *C* ist das beobachtete Auge, *B* ist das Auge des Beobachters, die Glasplatte *S* bildet mit der Verbindungslinie beider Augen einen Winkel von 45°. Von der Lichtflamme *A* gehen die Strahlen nach *S*, werden zum Theil in das Auge *C* hinein reflectirt und erleuchten dasselbe. Die aus dem Auge *C* zurückkehrenden Strahlen treffen wiederum die Glasplatte und gehen zum Theil durch dieselbe hindurch in das Auge des Beobachters, zum Theil werden sie wieder nach *A* zurückgeworfen. Man sieht nun in diesem Falle die Pupille des Auges *C* hell erleuchtet und zwar sieht man in der That die erleuchtete Netzhaut mehr oder weniger deutlich. Die heraustretenden Strahlen, welche von dem Netzhautbildchen ausgehen und durch die Glasplatte hindurchtreten, würden sich in *a* zu einem Bilde vereinigen, welches ebenso weit von der Glasplatte entfernt ist als *A*. Die Strahlen werden aber

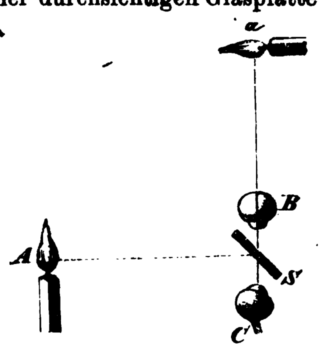


*Fig. 21.*

von dem Beobachter *B* abgefangen und lassen einen Theil der Netzhaut beobachten.

In der That ist eine in angegebener Weise schräg gestellte Glasspatte der einfachste Augenspiegel, und jedermann ist leicht im Stande den beschriebenen Versuch selbst anzustellen. Man kann dazu ein gewöhnliches Stück Fensterglas benutzen, und bringe es in diejenige Lage gegen ein Licht und das beobachtete Auge, wie es in der Figur angegeben ist. Zwischen

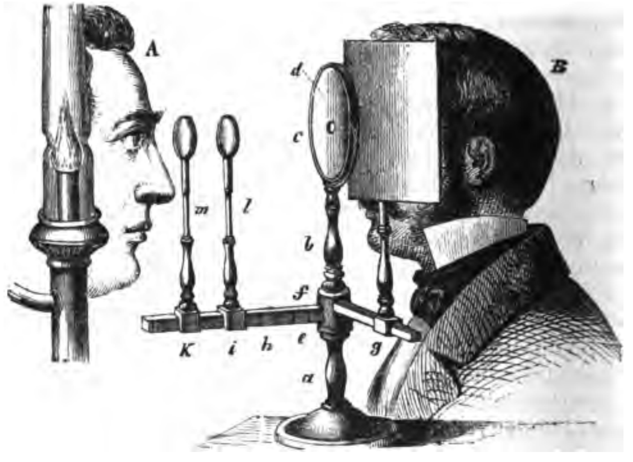



*Fig. 22.*

dem Licht und der beobachteten Person thut man gut irgendeinen Gegenstand als Schirm aufzustellen, damit das directe Licht nicht störend wirkt. Man setze sich dann dicht vor die beobachtete Person, halte das Glas in der beschriebenen Weise und wende es so lange hin und her bis der Reflex des Lichtes auf das Auge fällt. Dann sieht man durch das Glas hindurch die Pupille röthlich erleuchtet.

Um nun die Netzhaut in ihren einzelnen Theilen wirklich deutlich zu sehen, ist es nöthig, je nach der

Sehschärfe des Beobachters und dem Brechungsverhältnisse des beobachteten Auges Linsen anzuwenden, und eine solche Zusammenstellung bildet dann einen fertigen Augenspiegel. Man hat ferner die durchsichtige Glassplatte vortheilhaft durch einen Spiegel, gewöhnlich einen Hohlspiegel, ersetzt, der in der Mitte eine Oeffnung besitzt, durch welche der Beobachter hindurchsieht. Die Fig. 22 zeigt die Anwendung dieses Apparates nach der Construction von Ruete. Neben der

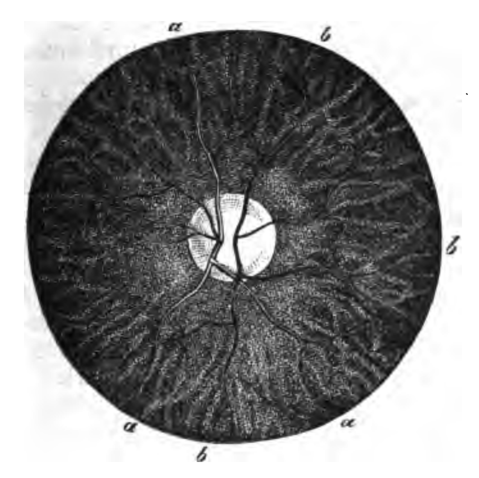



*Fig. 23.*

beobachteten Person *A* steht die Lichtflamme. Diese wirft Strahlen auf den Hohlspiegel *d*, der sie auf das beobachtete Auge reflectirt. Der Beobachter *B* sieht durch die Oeffnung des Hohlspiegels hindurch und schiebt die beiden Linsen *m* und *l* in diejenige Lage, bei welcher ein deutliches Bild der Netzhaut erscheint.

Man ist nun im Stande mit Hülfe des Augenspiegels die Netzhaut gründlich zu untersuchen. Die Fig. 23 zeigt ungefähr, was man in diesem Bilde unterscheidet.

Der Grund des Ganzen ist dunkel röthlich gefärbt, die Eintrittsstelle des Sehnerven hebt sich davon als ein rundlicher heller Fleck ab, und aus seiner Mitte gehen die Netzhautgefässe, Arterien *a* und Venen *b*, hervor, die sich über die ganze Netzhaut ausbreiten. Auch der gelbe Fleck, die Stelle des deutlichsten Sehens, zeichnet sich durch ein kleines helleres Fleckchen aus.

Der Augenspiegel ist für die Augenheilkunde ein Instrument von ganz unberechenbarem Werthe geworden. Viele krankhafte Veränderungen der Netzhaut und im Innern des Augapfels lassen sich durch die Beobachtung mit dem Augenspiegel erkennen und untersuchen; und in der That hat die Augenheilkunde seit der Erfindung desselben ausserordentliche Fortschritte gemacht.

Die Augen mancher Thiere, z. B. der Katzen, zeigen bekanntlich ein eigenthümliches Leuchten, das namentlich abends deutlich bemerkbar ist. Man glaubte früher, dass die Augen solcher Thiere selbst Licht entwickelten, ebenso wie man glaubte, dass auch das Auge des Menschen im Affect leuchten könne. Die Ursache des Augenleuchtens ist aber bei jenen Thieren eine Tapete glänzender Fasern, das sogenannte Tapetum, welches hinter der Netzhaut liegt und stark Licht reflectirt. Bei vollkommener Dunkelheit findet auch in diesen Augen kein Leuchten statt, wovon man sich durch genaue Versuche überzeugt hat, aber es genügen schon kleine Lichtmengen um dieselben leuchtend erscheinen zu lassen.

---

# Viertes Kapitel.

Bau der Netzhaut. — Der blinde Fleck und der gelbe Fleck. — Ort der Lichtempfindung in der Netzhaut.

Die Netzhaut ist das nervöse Organ des Auges, ein feiner und höchst complicirter Apparat, dessen Mechanismus bisjetzt nur in geringem Grade verständlich ist, und dessen Bau lange Zeit der Gegenstand mühevoller Untersuchungen gewesen und es jetzt noch ist. Man unterscheidet in der Netzhaut, wenn man einen feinen Querschnitt derselben mikroskopisch betrachtet, verschiedene Schichten. Die innerste derselben, welche der Oberfläche des Glaskörpers zunächst liegt, besteht aus Nervenfasern, in welche sich der eintretende Sehnerv auflöst. Derselbe durchbohrt (Fig. 7) alle Häute des Auges etwas nach innen von der Mitte und zugleich kommen hier die Blutgefässe mit in das Auge hinein, welche man entoptisch wahrnehmen kann. An der Eintrittsstelle besteht daher die Netzhaut nur aus den Nervenfasern des Sehnerven, welche von hier strahlenförmig sich ausbreiten. Aber eine Stelle lassen sie frei, welche im Centrum der Netzhaut liegt und ihrer gelblichen Färbung wegen der gelbe Fleck genannt wird, und gehen bogenförmig um dieselbe herum. Diese Stelle ist es, mit der wir am deutlichsten sehen, und von deren Structur wir daher noch eingehender sprechen werden.

Die Schichten der Netzhaut, wie sie in neuerer Zeit von Max Schultze beschrieben worden sind, sehen wir in Fig. 24 abgebildet. Zu innerst liegt ein feines Grenzhäutchen *1*. Alsdann folgen nach aussen: die Nervenfaserschicht *2*, die Ganglienzellenschicht *3*, die aus Zellen besteht, welche den Ganglienzellen des Gehirns ähnlich sind, dann die feinkörnige Schicht *4*, welche aus einer grauen unbestimmten

Masse mit feinen Punkten besteht, dann die innere Körnerschicht *5*, welche rundliche Körnchen zeigt,

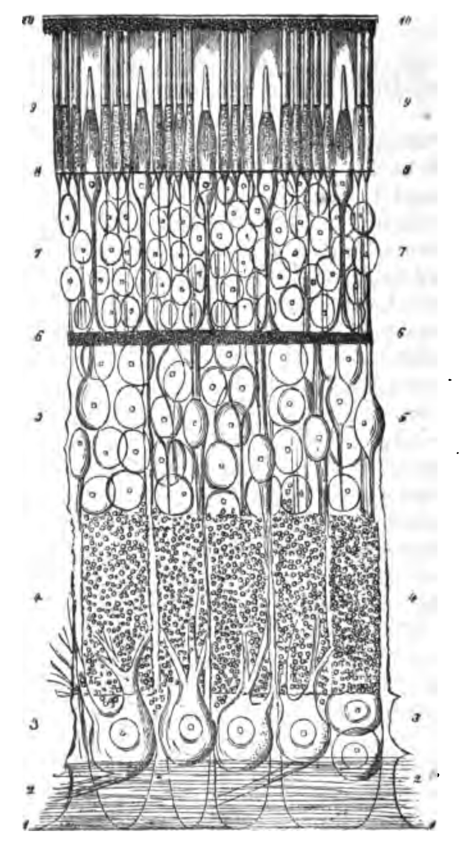



*Fig. 24.*

dann die Zwischenkörnerschicht *6*, aus einer feinen körnigen Masse mit Fäserchen bestehend, dann folgt die äussere Körnerschicht *7*, welche der innern

ganz ähnlich ist, und schliesslich nach einem zweiten feinen Grenzhäutchen *8* befindet sich am weitesten nach aussen die Stäbchen- und Zapfenschicht *9*, die eine ganz besonders auffallende Structur zeigt. Sie besteht zum grössten Theil aus freien durchsichtigen Stäbchen, welche wie Pallisaden senkrecht gegen die Oberfläche der Netzhaut dicht aneinander aufgestellt sind. Von Zeit zu Zeit findet sich aber zwischen ihnen ein nach unten breiter werdendes Stück, das man Zapfen genannt hat. Solche Zapfen finden sich ausschliesslich dicht aneinander liegend in der Mitte des gelben Fleckes, welche eine kleine Vertiefung, die Netzhautgrube, zeigt. Im gelben Flecke sind sie sehr häufig, nehmen dann aber bis zum Rande der Netzhaut an Häufigkeit ab.

Die Stäbchen- und Zapfenschicht ist es, welche vermöge ihrer regelmässigen Anordnung zunächst einen Anhaltepunkt für Vermuthungen über den Vorgang des Sehens darbietet. Das in das Auge einfallende Licht muss ohne Zweifel alle genannten Schichten der Netzhaut passiren und gelangt schliesslich zur Stäbchen- und Zapfenschicht, welche aussen von dem schwarzen Pigment (10) der Aderhaut bedeckt ist. Weiter kann das Licht nicht dringen, denn hier wird es vom schwarzen Pigment absorbirt.

Die Stäbchen und Zapfen haben, ihrem Ansehen nach zu urtheilen, alle Eigenschaften, durch welche sie zu Empfindungsorganen gekennzeichnet werden. Sie bilden auf der Oberfläche der Netzhaut eine continuirliche Tapete, welche einer ganz regelmässigen feinen Mosaik gleicht, und dadurch erscheint jeder Punkt der Netzhaut mit einer gesonderten Empfindlichkeit ausgestattet, die ihm durch ein Stäbchen oder Zapfen verliehen wird, während doch gleichzeitig alle in einem innigen geometrisch gegebenen Zusammenhange zueinander stehen. Diese Eigenschaften stimmen so sehr mit der mathematischen Schärfe unseres Sehvermögens überein, dass sich unmittelbar die Vermuthung aufdrängt, es

müsse in dieser Mosaik der Vorgang der Lichtempfindung stattfinden. Wenn wir also von einem Punkte des Gesichtsfeldes durch den Knotenpunkt des Auges einen Strahl nach der Netzhaut ziehen, so trifft dieser ein Stäbchen oder einen Zapfen, bildet sich auf einem Feldchen ab und wird von diesem gesondert wahrgenommen. So können wir das ganze Gesichtsfeld auf der Netzhaut aus einer feinen Mosaik zusammengesetzt denken, ähnlich wie das Bild einer Stickerei.



Fig. 25.

Von allen Schichten der Netzhaut werden die Fasern des Sehnerven zuerst von den Lichtstrahlen getroffen, und man könnte daher glauben, dass diese sich nicht unempfindlich dagegen verhalten müssten. Aber das ist nicht der Fall. Der berühmte Physiker Mariotte hat schon gezeigt, dass der Sehnerv selbst ohne die Netzhaut nicht im Stande ist, eine Spur von Licht wahrzunehmen. Es gibt nämlich auf der Netzhaut einen Fleck, der vollständig blind ist, und sich gerade an der Stelle befindet, wo der Sehnerv in das Auge eintritt (Fig. 7).

Man fixire in Fig. 25 mit dem rechten Auge, während man das linke zudrückt, das kleine weisse Kreuz, und halte das Buch ungefähr in der Entfernung, in welcher ein gutes Auge gewöhnlich liest. Wenn man nun so das Buch in kleinen Grenzen ab und zu bewegt, so wird man eine Entfernung finden, in welcher der grosse weisse Kreis rechts ganz verschwindet. Dabei muss man aber das kleine Kreuz immer scharf fixiren. Sobald man das Auge von diesem nach irgendeiner Seite hin abwendet, kommt der weisse Kreis wieder zum Vorschein.

In diesem Versuche fällt nämlich der weisse Kreis unter der angegebenen Bedingung gerade auf die Eintrittsstelle des Sehnerven, welche in beiden Augen nach innen vom Centrum der Netzhaut, dem gelben Flecke, liegt. Das Merkwürdige dabei ist, dass wir an dieser Stelle keineswegs eine Lücke im Gesichtsfelde wahrnehmen, sondern dass die Punkte, welche wir mit dem Rande des blinden Fleckes sehen, aneinander rücken und so diese Lücke ausfüllen. Der schwarze Grund, auf dem der weisse Kreis sich befindet, erscheint daher ganz continuirlich, und dies würde auch der Fall sein, wenn der Grund weiss und der Kreis schwarz wäre. Auch beim gewöhnlichen Sehen empfinden wir keine dunkle Lücke im Raume, wol aber gelingt es dem Geübten wahrzunehmen, dass Gegenstände, welche gerade auf den blinden Fleck fallen, ganz verschwinden; selbst die Sonne kann man am Himmel verlöschen lassen, wenn ihr Bild auf den blinden Fleck geworfen wird. Nur muss man in diesen Versuchen ein Auge schliessen, weil derselbe Gegenstand in beiden Augen nicht gleichzeitig auf den blinden Fleck fallen kann.

Dieser merkwürdige Versuch lehrt uns nun ferner, dass die Fasern des Sehnerven vom Licht nicht im geringsten erregt werden, und wir werden weiter daraus schliessen können, dass auch die Faserschicht der Netzhaut vom Lichte durchflossen wird, ohne dass eine Einwirkung desselben hier stattfindet.

Der gelbe Fleck der Netzhaut zeigt ferner hervorragende Eigenschaften, die wir betrachten wollen.

Wenn wir einen Punkt genau ins Auge fassen, ihn fixiren, so geht der Sehstrahl von diesem Punkte durch die Mitte der Pupille, den Mittelpunkt der Linse und trifft die Netzhaut nahezu in ihrem Mittelpunkte, wo sich der gelbe Fleck befindet. Im gelben Fleck ist also das Sehvermögen der Netzhaut am schärfsten, und in diesem ist es wiederum die Netzhautgrube, mit welcher wir einen einzelnen Punkt im Gesichtsfelde scharf zu fixiren vermögen.

Der Bau des gelben Fleckes erklärt nun in der That seine besondern Eigenschaften. Wir haben schon erwähnt, dass die Nervenfasern des Sehnerven bei ihrer Ausbreitung auf der Netzhaut in Bögen um den gelben Fleck herumziehen, offenbar zu dem Zwecke, um ihm nicht einen Theil des einfallenden Lichtes zu rauben. Auch dies ist wiederum ein Beweis dafür, dass die Nervenfasern nicht vom Lichte getroffen zu werden brauchen, damit wir sehen.

Im gelben Flecke finden wir nun die Zapfen ausserordentlich fein ausgebildet und dicht gedrängt nebeneinander stehend. Diese müssen wir daher ganz besonders als lichtempfindliche Elemente betrachten. Es befinden sich ausser ihnen auch Ganglienzellen im gelben Flecke und die übrigen Schichten in dünnen feinen Lagen, ferner kleine Pigmentkörnchen, welche die gelbliche Farbe erzeugen.

Wenn also, wie es erwiesen ist, die Sehnervenfasern selbst ganz unempfindlich gegen das Licht sind, und die Einwirkung der Lichtwellen in den Stäbchen und Zapfen stattfindet, so ist doch ein Zusammenhang der Nervenfasern mit diesen Organen von vornherein ausserordentlich wahrscheinlich. Auf diesen Zusammenhang haben daher die Mikroskopiker schon seit geraumer Zeit ihr Augenmerk gerichtet, und die neuern Untersuchungen über diesen Gegenstand stimmen darin überein, dass ein solcher existirt. Freilich ist die Ver-

bindung nur durch sehr feine Fädchen hergestellt, welche durch alle Schichten der Netzhaut hindurchgehen und sich oft schwer nachweisen lassen, aber doch sind sie, Dank den unermüdlichsten Forschungen, mit Sicherheit gesehen worden. Fig. 26 zeigt, wie die Nervenfaser *2* sich mit der Ganglienzelle *3*, dem Korne der Körnerschichten *5* und *7* und schliesslich sich mit den Stäbchen und Zapfen *9* verbindet; und das ist der Weg, auf welchem die Lichterregung, die im Zapfen vor sich geht, sich weiter auf den Sehnerv hin fortpflanzt, welcher sie schliesslich zum Gehirn befördert und hier das Bewusstsein einer Lichtempfindung erzeugt.

Der Sehnervenstamm kann auch wie jeder andere Nerv, ohne Vermittelung der Netzhaut, direct gereizt werden, und jedesmal entsteht dabei eine Lichtempfindung. Wenn bei Operationen am Auge der Sehnerv durchschnitten wird, so empfindet der Operirte dabei keinen Schmerz, wol aber einen intensiven Lichtblitz, auf welchen ewiges Dunkel folgt. Auch elektrisch kann man den Sehnerv erregen, wenn man Ströme durch

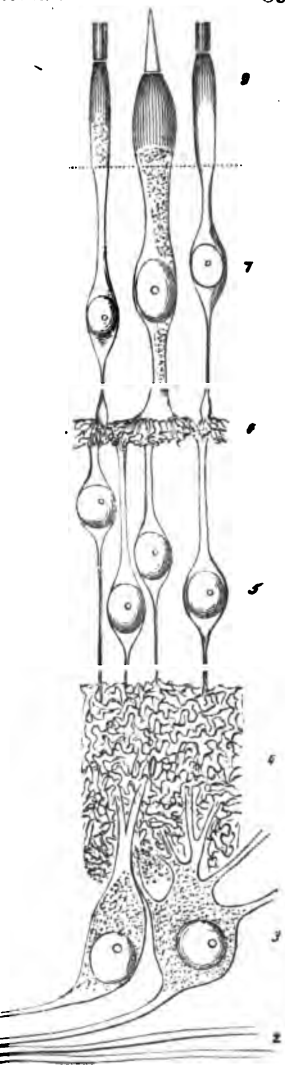



*Fig. 26.*

die Augenhöhle und den Schädel leitet, und hierbei beobachtet man ebenfalls Lichtblitze im Gesichtsfelde.

Die Untersuchungen auf dem Gebiete der Nervenphysiologie haben zu dem Resultate geführt, dass alle unsere Nerven nur Leitungsorgane für ein und denselben Vorgang sind, für die Nervenerregung, die in ihnen nach gleichem Gesetze sich fortpflanzt. Die Gefühlsnerven, der Sehnerv, der Hörnerv, der Geschmacksnerv und der Riechnerv, sie alle stimmen in ihrem Wesen überein. Der Sehnerv leitet ebenso wenig die Lichtwellen zum Gehirn, als der Gehörnerv die Schallwellen. Aber beide Nerven besitzen an ihren Enden verschiedenartige Apparate, die man Sinnesorgane nennt und vermöge deren sie in Erregung versetzt werden. Der Endapparat des Sehnerven ist das Auge oder im engern Sinne die Netzhaut, welche die Eigenschaft besitzt, durch Lichtwellen gereizt zu werden und diese Reizung auf den Sehnerven zu übertragen. Der Endapparat des Hörnerven befindet sich im innern Ohr und versetzt durch seine Schwingungen den Hörnerven in Erregung. Ist nun in beiden Sinnesorganen der Vorgang erst in den Nerven angelangt, so ist er in beiden derselbe und trägt nichts mehr von den Spuren eines Tones oder einer Lichterscheinung an sich. — Wie kommt es aber, wird man fragen, dass unser Gehirn beide Vorgänge so verschiedenartig empfindet? — Die Antwort lautet, weil beide Nerven ein besonderes Centrum im Gehirn haben, in welchem sie enden. Das Centrum des Sehnerven besitzt andere eigenthümliche Eigenschaften als das Centrum des Hörnerven. Das erstere entwickelt in sich nur Lichtempfindung, sobald es in Thätigkeit versetzt wird, das letztere nur Gehörsempfindung. Beide Centra sind ganz mechanisch und somit einseitig thätige Organe, welche nichts anderes hervorzubringen vermögen als ein und denselben Vorgang. Daher entsteht eine Lichtempfindung, auch ohne dass Licht in das Auge einfällt,

sobald der Sehnerv gezerrt oder durchschnitten oder elektrisch gereizt wird, weil der Sehnerv seine Erregung dem Centrum mittheilt, und dieses mit Lichtempfindung darauf antwortet. Ebenso verhält es sich mit dem Hörnerven, dessen Centrum immer nur Gehörsempfindung erwecken kann und niemals etwas anderes. Wäre durch einen zufälligen Umstand der Hörnerv mit dem Auge verwachsen und der Sehnerv mit dem Ohre, so würde jeder Lichtstrahl einen Ton erzeugen und jeder Schall in unserm Ohre einen Lichtschein in unserer Vorstellung erwecken, wir würden dann eine Symphonie sehen und ein Gemälde hören.

Kehren wir nun wieder zu dem Vorgange der Lichtempfindung in der Netzhaut zurück, so müssen wir uns davon folgende Vorstellung machen.

Die Lichtwellen erzeugen in den Zapfen und Stäbchen der Netzhaut auf eine bisjetzt noch ganz unerklärliche Weise einen Process, der höchst wahrscheinlich aus einer Veränderung in den kleinsten Theilchen derselben, aus einer Bewegung von Molekülen besteht. Die Zapfen und Stäbchen theilen diese innere Bewegung durch die angegebenen Verbindungsfäden den übrigen Schichten der Netzhaut mit, und so gelangt sie von einem bestimmten Zapfen zu einer bestimmten damit verbundenen Nervenfaser, in welcher dadurch eine Nervenerregung hervorgerufen wird. Diese Nervenerregung erzeugt dann erst im Gehirn die Lichtempfindung.

Durch eine sehr sinnreiche Messung und Berechnung ist von Heinrich Müller bewiesen worden, dass die Stäbchen und Zapfen der Ort sind, wo in der Netzhaut die Lichtperception stattfindet. Er benutzt dazu die Purkinje'sche Aderfigur. Wenn man nämlich (Fig. 20) die Lichtflamme hin- und herbewegt, so bewegt sich auch die Figur, wie es die Construction zeigt. Nun entsteht diese Figur durch den Schatten der Netzhautgefässe, und es lässt sich aus der angegebenen Construction die Lage des Schattens auf folgende Weise

berechnen. Wenn man den Winkel *a k a'* misst, um den man die Lichtflamme bewegt, der dem Winkel *b k b'* gleich ist, so kennt man auch die Entfernung *b b'* auf der Netzhaut. Nun lässt sich ferner die Entfernung des Gefässes *v* von *b b'* annähernd bestimmen, also kann man auch den Winkel *b v b'* berechnen, der dem Winkel *c v c'* gleich ist. Es sind nun *c* und *c'* die Schatten des Gefässes, welche sich scheinbar im Gesichtsfelde von *d* nach *d'* bewegen. Man misst daher ferner den Winkel *d k d'* durch Beobachtung, der gleich *c k c'* ist, berechnet daraus die Linie *c c'*, da man *k c* kennt, und hat nun in dem kleinen Dreieck *c v c'*, das man als gleichschenkelig betrachten kann, die Grundlinie *c c'* und den Winkel *c v c'*. Daraus kann man nun die Entfernung des Gefässchens *v* von dem Orte des Schattens ermitteln, und man findet dann in der That, dass der Schatten gerade in die Stäbchen- und Zapfenschicht fällt.

Welcher Art mag nun die Einwirkung des Lichts auf die Stäbchen und Schatten sein? — Man kann sich nach unsern jetzigen Kenntnissen von den Eigenschaften des Lichts einige Möglichkeiten denken. Die Einwirkung könnte z. B. eine chemische sein. Diese Vermuthung liegt am nächsten, weil wir wissen, dass das Licht auf einer photographischen Platte durch chemische Zersetzung des Jodsilbers oder des Chlorsilbers ein Bild erzeugen kann. Man könnte daher annehmen, dass auch in den Stäbchen und Zapfen eine Substanz vorhanden sei, welche sich durch das Licht chemisch verändere, und dass gleichsam ein wirkliches substanzielles Bildchen auf der Netzhaut entstände. Freilich wäre dieses Bild kein bleibendes, wie das einer Photographie, denn es verschwindet, sobald das Licht nicht mehr ins Auge fällt, und man müsste sich denken, dass es durch den Vorgang der Ernährung, durch das strömende Blut gleichsam immer wieder fortgewischt würde. Ein solches chemisches Bildchen würde auch im Stande sein, die Enden der Sehnerven-

fasern in Erregung zu versetzen, denn wir wissen, dass Nerven durch chemische Agentien gereizt werden können. — Doch dies alles bleibt vorläufig nur ungewisse Vermuthung. Ebenso verhält es sich auch mit der Möglichkeit, dass die Einwirkung des Lichts auf die Netzhaut elektrische Vorgänge erzeugt, von denen wir wissen, dass sie in den Nerven und Muskeln stattfinden. Kurzum es bleibt für die Wissenschaft noch ein zu erforschendes Räthsel, welche Kraft es ist, die den Stäbchen und Zapfen die höchst merkwürdige Eigenschaft verleiht, vermöge des Lichts den Sehnerven in Erregung zu versetzen.

---

## Fünftes Kapitel.

Die Farben des Spectrums. — Die Mischung der Farben. — Die drei Grundfarben. — Die Farbenblindheit.

Das Licht, welches unser Auge in der Natur wahrnimmt, ist kein gleichartiges, vielmehr unterscheiden wir eine Anzahl von Lichtarten, welche wir als Farben bezeichnen. Die Gegenstände, welche wir sehen, besitzen alle eine gewisse Farbe, die von dem Lichte herrührt, welches sie reflectiren oder durchlassen. Daher sprechen wir auch im gewöhnlichen Leben von gefärbtem Lichte, obwol wir aus der Physik wissen, dass die Farbe nichts ist was vom Lichte trennbar, wie etwa eine Malerfarbe, die auf einen Körper aufgetragen ist. Diejenige Lichtart, welche wir Weiss nennen, lässt sich künstlich mit Hülfe eines Prismas in eine Anzahl von Farben zerlegen, in denen alle einfachen Farben enthalten sind, und aus denen sich alle Farbenarten, die in der Natur vorkommen, durch Mischung herstellen lassen. Wenn wir einen Sonnen-

strahl auf ein Prisma fallen lassen, wie es Fig. 27 zeigt, so wird dieser Strahl in eine Anzahl von Farben zerlegt, deren Gesammtheit ein **Spectrum** genannt wird.

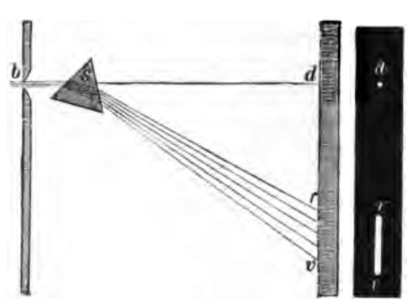



*Fig. 27.*

Durch die Oeffnung *b* fällt ein Strahl auf das Prisma *S*. Würde er ungebrochen weiter gehen, so entstünde auf der gegenüberliegenden Wand ein heller Kreis *d*. Vermöge der Brechung aber wird der Strahl abgelenkt, und da die in ihm enthaltenen farbigen Strahlen verschiedene Brechbarkeit besitzen, so entsteht ein farbiger Streifen *r v*, ein Spectrum, in welchem bei *r* sich das Roth befindet, das am schwächsten gebrochen wird, und bei *v* das am stärksten gebrochene Violett.

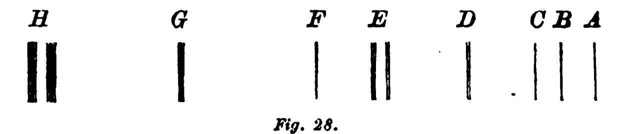



*Fig. 28.*

Fig. 28 enthält die im Spectrum sichtbaren Farben in ihrer Reihenfolge. Es befinden sich darin ausserdem dunkle Streifen, die Frauenhofer'schen Linien, welche dem Sonnenlichte eigenthümlich sind und von der Absorption der an der Sonnenoberfläche vorhandenen Gase

herrühren. Das Spectrum beginnt mit Roth, welches allmählich in Orange übergeht, dann folgt ein schmaler Streifen von reinem Gelb bei der Linie *D*, dann Grün bei *E*. Das nun folgende Blau ist ziemlich ausgedehnt, und man unterscheidet daher Cyanblau hinter der Linie *F* und Indigoblau bei *G*. Schliesslich sehen wir das Spectrum mit Violett enden.

Die Farben sind im Spectrum nicht scharf voneinander abgegrenzt, sondern gehen allmählich ineinander über. Als ganz reine Farben können wir Roth, Gelb, Grün, Blau, Violett unterscheiden, von denen jede eine Empfindung erzeugt, die mit der andern keine Aehnlichkeit hat. Je näher aber zwei Farben einander im Spectrum liegen, desto verwandter scheinen sie einander zu sein. So scheint das Roth dem Gelb verwandter zu sein als dem Grün oder Blau, der Eindruck des Gelben und Grünen kommt uns ähnlicher vor als des Gelben und Blauen oder Violetten u. s. w. Ein directer, wenn noch so allmählicher Uebergang von Roth in Grün würde uns unnatürlich scheinen, während das dazwischen liegende Gelb eine natürliche Verbindung zwischen Roth und Grün herstellt.

Die Physik lehrt, dass die Strahlen eines Spectrums aus Lichtschwingungen von verschiedener Wellenlänge bestehen, welche vom rothen zum violetten Ende kleiner werden. Da das Licht sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortpflanzt, so macht das violette mehr Schwingungen in derselben Zeit als das rothe, das erstere ungefähr 667 Billionen, das letztere 456 Billionen Schwingungen in einer Secunde. Die Physik lehrt ferner, dass alle Lichtstrahlen eines Spectrums sich einzig und allein durch die Wellenlänge ihrer Schwingungen unterscheiden, und sonst keine andern besondern Merkmale an sich tragen, nichts was nur im geringsten Aehnlichkeit mit der Farbe hat, wie wir sie empfinden. Denken wir uns auf der Oberfläche des Wassers längere und kürzere Wellen sich fortbewegen, so würde diese Erscheinung dem Vorgange im

rothen und violetten Lichtstrahl ungefähr analog sein. Die Wasserwellen von verschiedener Länge sind sich aber, dem Eindruck nach, den sie auf unser Auge ausüben, ganz gleichartig, die Lichtwellen von verschiedener Länge dagegen, welche in unser Auge eindringen, erzeugen hier Empfindungen, deren Qualität sich wesentlich unterscheidet. Denn Roth ist von Grün und Blau eben himmelweit verschieden.

Das Spectrum hat an seinen beiden Enden keine scharfen Grenzen, sondern geht hier allmählich in Schwarz über, am violetten Ende allmählicher als am rothen. Nichtsdestoweniger sind in diesen unsichtbaren Grenzen noch physikalische und chemische Wirkungen bemerkbar. Das unsichtbare Roth, das Ultraroth, zeigt eine beträchtliche Wärme, die hier im ganzen Spectrum ihr Maximum erreicht und in den sichtbaren Theil hinein allmählich abnimmt. Das violette Ende des Spectrums ist im Stande, starke chemische Wirkungen auf gewisse Verbindungen, wie Jodsilber und Chlorsilber, auszuüben, und daher erscheint uns ein photographirtes Spectrum über das violette Ende hinaus bedeutend verlängert. Es ist aber von Helmholtz gezeigt worden, dass wir unter gewissen Bedingungen auch den ultravioletten Theil des Spectrums mit dem Auge wahrnehmen können, Wenn man aus einem Spectrum, welches auf einem Schirme in einem dunkeln Zimmer entworfen wird, den ultravioletten Theil absondert, indem man ihn durch einen Spalt des Schirmes hindurchtreten lässt, ihn dann nochmals durch ein zweites Prisma leitet, damit er durch Brechung von allen fremden Strahlen gereinigt wird, so nimmt das Auge ihn als einen Lichtschimmer wahr, welcher eine lavendelgraue Farbe besitzt.

Das Auge ist, wie wir somit erkennen, nur bis zu einer gewissen Grenze für Lichtschwingungen empfindlich. Die Physik nimmt an, dass alle Strahlen in einem Spectrum, sowol die sichtbaren als auch die unsichtbaren, welche jenseits des Roth und Violett liegen,

aus Schwingungen des Lichtäthers bestehen, welche sich nur durch ihre Wellenlänge unterscheiden und sonst in ihrer Form ganz gleichartig sind. Von diesen Schwingungen wirken aber nur solche von mittlerer Länge auf unsere Netzhaut ein, und für die Aetherschwingungen von grösster und von kleinster Wellenlänge ist dieselbe unempfindlich. Das, was wir daher überhaupt Licht und Farbe nennen, beruht auf einer subjectiven Eigenschaft unserer Netzhaut, insofern sie nur auf gewisse Aetherschwingungen reagirt, und es wäre denkbar, dass es Augen gäbe, welche nicht für den mittlern Theil des Spectrums empfindlich wären wie das unserige, sondern für die an dem unsichtbaren Ende gelegenen Strahlen. Solchen Augen würde die Welt in ganz anderm Lichte erscheinen.

Alle Farben, welche wir in der Natur finden oder künstlich herstellen, seien es einfache oder zusammengesetzte Farben, lassen sich aus den Farben des Spectrums zusammensetzen. Ferner entsteht aus der Mischung aller Spectralfarben in dem Verhältniss, wie sie im Spectrum vorkommen, das weisse Licht. Alles sichtbare Licht, das vom Auge überhaupt wahrgenommen werden kann, ist also in seinen Bestandtheilen im Spectrum bereits enthalten.

Um zu untersuchen, welchen Eindruck die Mischungen von Farben auf unser Auge machen, hat man sich früher damit begnügt, Farbstoffe, wie sie in der Malerei benutzt werden, miteinander zu mischen oder gefärbte Flüssigkeiten zu mengen. Es war aber ein Irrthum, wenn man glaubte, dadurch die wirkliche Mischfarbe zu erhalten, d. h. diejenige Farbe, welche unser Auge empfindet, wenn die beiden einfachen Farben gleichzeitig auf dasselbe einwirken. Wenn wir z. B. ein blaues und gelbes Pulver mit Wasser angerührt mischen, so erhalten wir ein Grün. Niemals aber erhalten wir ein Grün, wenn wir auf anderm Wege gelbe und blaue Lichtstrahlen miteinander mengen. Die Ursache dieses Unterschiedes liegt in folgendem. Eine Pigmentfarbe,

welche als Malerfarbe benutzt wird, besteht aus kleinen Partikelchen, welche durchsichtig sind, indem sie eine gewisse farbige Lichtart durchlassen und die übrigen absorbiren. Wenn wir nun eine grössere Menge davon bei auffallendem Lichte betrachten, so wird ein kleiner Theil an der Oberfläche reflectirt, der aus weissem Lichte besteht, der grössere Theil dringt in die obersten Schichten ein und wird von den Oberflächen der tiefer liegenden Partikelchen wieder zurück reflectirt. Dieses Licht ist gefärbt, d. h. die übrige Lichtmenge des weissen Lichts ist absorbirt worden. Ein gelbes Pulver absorbirt also alle andern Strahlen mit Ausnahme der gelben; doch ist dies nicht absolut der Fall, sondern es werden auch Strahlen durchgelassen, welche dem Gelb nahe liegen, unter andern auch etwas Grün.

Mit dem blauen Pulver verhält es sich ebenso, auch dieses lässt neben dem Blau einen Theil Grün hindurch, während es andere Strahlen absorbirt. Nun liegen in dem Gemisch blaue und gelbe Partikelchen hintereinander. Die blauen Strahlen werden daher vom gelben und die gelben Strahlen von dem blauen Farbstoff absorbirt, sodass Blau und Gelb in der gemischten Farbe fast verschwinden, und es bleibt daher nur das grüne Licht übrig, das reflectirt wird, weil es von beiden Stoffen in gewisser Menge durchgelassen wird. Der Vorgang ist ganz derselbe, als wenn wir ein blaues und gelbes Glas aufeinander legen und hindurchblicken. Es erscheint dann grün; denn durch das blaue Glas geht nur Blau und etwas Grün, aber kein Gelb, das gelbe Glas absorbirt davon das Blau vollständig und lässt nur das Grün hindurch.

Ganz anders sind dagegen die Erscheinungen, wenn man zwei Farben zugleich auf das Auge einwirken lässt, was man mit Hülfe folgender Methoden erreichen kann. Man entwirft ein Spectrum auf einem Schirme, in welchem sich zwei verstellbare Spalte befinden. Durch diese fallen zwei Strahlen von einfacher Farbe

hindurch und werden dann durch eine Linse vereinigt. Dies ist die vollkommenste Methode der Farbenmischung.



Fig. 29.

Eine leichter ausführbare Art der Farbenmischung gestattet der Farbenkreisel.

Dieses Instrument besteht aus einer Scheibe, die um

eine senkrechte Axe in Rotation versetzt werden kann, wie es Fig. 29 zeigt. In der einen Hand hält man eine Hülse, welche die Axe des Kreisels oben fixirt, und mit der andern zieht man einen um die Axe geschlungenen Faden kräftig ab, sodass der Kreisel in schnelle Rotation geräth. Auf den Kreisel hat man nun vorher eine Papierscheibe aufgelegt, auf welcher, wie in der Figur zu sehen, Sectoren aufgezeichnet sind mit denjenigen Farben, welche man mischen will. Das Auge nimmt dann diese Farben so schnell hintereinander an demselben Orte wahr, dass der Eindruck zu einem gemeinsamen verschmilzt.* In diesem Falle vereinigen sich die Farbenempfindungen auf der Netzhaut wirklich zu der Empfindung einer Mischfarbe. Wenn man schwarze und weisse Sectoren auf der Scheibe hat, so entsteht bei der Rotation ein gleichmässiges Grau, und durch Anwendung von Farben kann man eine grosse Zahl von Mischfarben aller möglichen Nüancen erzeugen, welche man ausserdem durch Hinzufügung von Schwarz dunkler machen kann.

Eine sehr einfache Art zwei Farben miteinander zu mischen, welche man ohne viel Hülfsmittel leicht anstellen kann, ist folgende. Man lege zwei farbige Oblaten *b* und *c* (Fig. 30) in einiger Entfernung voneinander auf den Tisch und halte eine kleine Glasscheibe *a* so vor das Auge, dass man dadurch direct die Oblate *b* erblickt und gleichzeitig ein Spiegelbild von der Oblate *c*, sodass beide Bilder sich decken und ihre Farben miteinander vereinigen. Auch in diesem Falle erhält man wirkliche Mischfarben.

Alle diese Methoden geben nun übereinstimmende Resultate, obgleich die zweite Methode des Farbenkreisels auf einem andern Princip beruht als die beiden andern. Bei den letztern werden die verschieden-

* Sehr instructiv ist der Lohmeier'sche Farbenkreisel, den man aus Berlin beziehen kann.

farbigen Lichtstrahlen, bevor sie in das Auge einfallen, objectiv miteinander gemischt, durch den Farbenkreisel dagegen werden die verschiedenfarbigen Strahlen nicht vorher gemischt, sondern nur schnell hintereinander in das Auge geleitet, und erst in der Netzhaut findet eine Mischung der Einzelempfindungen statt. Hieraus erkennen wir aber, dass eine Mischfarbe nicht eine besondere Erregung in der Netzhaut verursacht, sondern dass diese immer zusammengesetzt ist aus denjenigen Erregungen, welche jede einzelne Farbe hervorbringt.

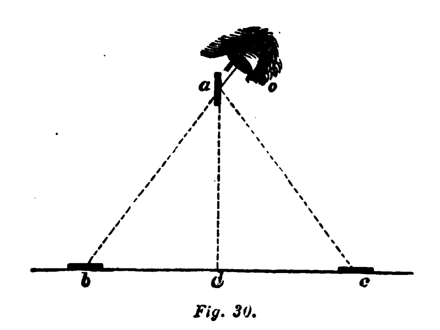



*Fig. 30.*

Wenn nun auf einem Farbenkreisel alle im Spectrum enthaltenen Farben möglichst getreu und im Verhältniss ihrer Lichtstärken wiedergegeben sind, so gibt ihre Mischung wiederum ein Weiss, das wegen der unvollkommenen Helligkeit der angewendeten Farben mehr oder weniger grau erscheint. Ganz dasselbe Grau lässt sich aber auch auf dem Farbenkreisel aus einem schwarzen und weissen Sector mischen, und da Schwarz eben nichts anderes ist als Abwesenheit von Licht, so entspricht das Gemisch der Farben ganz genau demjenigen Weiss, welches in diesem Grau enthalten ist.

Die Mischung zweier einfacher Spectralfarben hat zu einem sehr bemerkenswerthen Ergebniss geführt. Man findet nämlich, dass es mehrere Farbenpaare gibt, welche zusammen ein Weiss geben. Zu diesem Paare

gehört z. B. Gelb und Indigblau, während zwei Farbstoffe von dieser Farbe miteinander gemischt ein Grün geben. Solche Paare bezeichnet man als complementäre Farben, und zu ihnen gehören ausser den genannten Roth und Grünlichblau, Orange und Cyanblau, Grünlichgelb und Violett.

Wenn wir nun diese Farbenpaare in dem Spectrum aufsuchen, so finden wir, dass zwei complementäre Farben immer einen gewissen Abstand voneinander einhalten. Zwei naheliegende Farben können niemals complementär sein, und ebenso wenig die beiden Enden des Spectrums, Roth und Violett, welche miteinander gemischt das Purpur geben. Wir bemerken ferner, dass eine von beiden Complementärfarben sich immer in der Nachbarschaft des Grün hält, so das Grünlichblau, das Cyanblau, das Gelb, das Grünlichgelb. Das reine Grün dagegen, wie es im Spectrum erscheint, besitzt keine einfache Complementärfarbe, es ist vielmehr nothwendig mit dem Grün zwei Farben, das Roth und Violett zu mischen, um Weiss zu erhalten.

Diese drei Farben, Roth, Grün und Violett hat man nun als Grundfarben angenommen, weil es die einzigen drei reinen Farbenqualitäten sind, welche zusammen ein ziemlich vollkommenes Weiss geben.

Wir wollen uns nun weiter damit beschäftigen, welche Bedeutung man diesen drei Grundfarben bei dem Vorgange der Farbenempfindung zugeschrieben hat.

Die grosse Anzahl von Farben und Farbentönen, wie sie uns in der Natur entgegentritt, ist durch die Entdeckung der Spectralfarben auf eine gewisse Zahl von einfachen Farben reducirt worden. Aber zwischen diesen finden sich auch im Spectrum eine grosse Reihe von Uebergangsstufen, welche verschiedenartige Nüancen darstellen. Eine jede Stelle des Spectrums ist von ihrer benachbarten im Farbentone verschieden, da dieser sich continuirlich mit der Wellenlänge der Lichtschwingungen ändert, und es erscheint daher die Anzahl der Farbenempfindungen, die das Spectrum erzeugt, mit

allen Uebergängen derselben eigentlich unendlich gross. Man hat sich deshalb die Frage vorgelegt: wie ist es möglich, dass die Netzhaut des Auges so vieler verschiedenartiger Erregungen fähig ist, denn eine jede Farbe muss doch auch einem besondern Erregungsvorgange entsprechen?

Um in diese Frage näher einzugehen, müssen wir wiederum auf die Vorstellungen der Nervenphysiologie zurückgreifen. Wir wissen, dass in den Stäbchen und Zapfen der Netzhaut die Lichterregung stattfindet und dass die Nervenfasern des Sehnerven von ihnen in Erregung versetzt werden. Wenn nun z. B. auf einen Zapfen rothes Licht einwirkt, so müsste in der Nervenfaser, welche mit diesem Zapfen in Verbindung steht, eine Erregung entstehen, welche irgendein Merkmal davon an sich trägt, dass wir es mit rothem Lichte zu thun haben; sonst wäre ja das Gehirn nicht im Stande die Empfindung des Roth zu erkennen. Wenn blaues Licht auf diesen Zapfen einwirkt, so müsste offenbar der Erregungsprocess in derselben Nervenfaser ein anderer sein, der dem Gehirn zu verkünden vermag, dass das einwirkende Licht blau ist, bei grünem Lichte müsste der Vorgang in der Nervenfaser wiederum ein verschiedener sein, kurzum für eine jede Farbe müssten wir in ein und derselben Nervenfaser besondere Erregungsvorgänge annehmen, die sich in ihrer Qualität voneinander unterscheiden.

Diese Consequenz steht aber in directem Widerspruch mit denjenigen Vorstellungen, welche man sich über den Process der Nervenerregung gebildet hat. Nach dieser Vorstellung sind alle Nerven ihrer Natur nach einander gleichartig und der Vorgang der Erregung in ihnen ein und derselbe. Man ist im Stande einen Empfindungsnerven und einen Bewegungsnerven zusammenzuheilen, sodass sie einen einzigen Nerven bilden, und in diesem Falle kann eine Reizung des Empfindungsnerven direct auf den Bewegungsnerven übergehen und Zuckungen in den ihm angehörigen Muskeln

erzeugen. In beiden Nervengattungen ist also der Erregungsvorgang derselbe, und wenn die Erregung eines Bewegungsnerven im Leben immer nur Bewegung, die eines Empfindungsnerven immer nur Empfindung wachruft, so liegt das einzig und allein daran, dass die erstern mit den Muskeln im Zusammenhange stehen, die letztern mit den Centren der Empfindung im Gehirn, und in diesem ganz verschiedenartigen Organe Erscheinungen verschiedener Natur anregen. Vom Sehnerven haben wir bereits früher auseinandergesetzt, dass er sich vor andern Nerven des Körpers in nichts auszeichnet. Man könnte statt seiner, wenn es ausführbar wäre, einen beliebigen Bewegungsnerven zwischen Auge und Gehirn einsetzen, es würde die Lichtwahrnehmung dadurch keineswegs aufgehoben sein. Die Reizung eines solchen Nerven würde im Gehirn immer nur Lichtempfindung erzeugen, weil das nervöse Centralorgan dieses Nerven, die sogenannte Sehsinnsubstanz im Gehirn nichts anderes als Lichtempfindung in sich entwickelt, wenn sie in Erregung versetzt wird. Wenn nun der Vorgang im Sehnerven kein anderer ist als in allen andern Nervengattungen, wie ist es da möglich, dass in ein und derselben Nervenfaser rothes Licht einen andern Vorgang erzeuge als blaues, grünes Licht wieder einen andern als jene u. s. w.?

Um aus dieser Schwierigkeit herauszukommen, liegt nur eine Möglichkeit offen, nämlich die Annahme, dass jedes lichtempfindliche Element der Netzhaut mit mehreren Nervenfasern in Verbindung steht, von denen jede für eine bestimmte Farbe empfindlich ist. Denken wir uns z. B. in einem Zapfen das Ende einer Nervenfaser, welches vermöge seiner physikalischen oder chemischen Beschaffenheit nur durch rothe Strahlen afficirt wird, so wird diese Nervenfaser dem Gehirn die Erregung zuführen, und das Gehirn erhält hierdurch ein Zeichen, dass eine gewisse Lichtart einwirkt, der es die Empfindung Roth zuertheilt. Mit demselben Zapfen denken wir uns eine andere Nervenfaser in Verbindung, deren

Ende daselbst nur durch grüne Lichtstrahlen erregt wird, so wird das Gehirn, wenn die Erregung auf dieser Faser ihm zugeleitet wird, Kenntniss davon haben, dass nun eine andere Lichtart vorhanden ist, die es nach seiner Erfahrung als Grün bezeichnet. So kann man sich vorstellen, dass mehrere Gattungen von Nervenfasern im Sehnerven existiren, die sich nur dadurch unterscheiden, dass ihre Endorgane innerhalb der Stäbchen und Zapfen verschiedenartig sind, sodass jedes derselben nur durch eine bestimmte Farbe erregt wird. — Aber wieviel solcher Faserarten sollen wir in einem lichtempfindlichen Netzhautelemente annehmen? — Man könnte versucht sein, für jede Farbenqualität im Spectrum je eine Nervenfaser in Anspruch zu nehmen, aber es genügt vollkommen, wenn wir entsprechend den oben erwähnten drei Grundfarben: Roth, Grün, Violett, die Zahl der Fasern auf drei reduciren. In der That erklären sich alle Erscheinungen der Farbenempfindung vollkommen aus der Annahme, dass in jedem Netzhautpunkte drei farbenempfindliche Nervenfasern enden, eine rothempfindende, grünempfindende und violettempfindende Nervenfaser.

Ebenso wie aus der Mischung von Roth, Grün und Violett sich Weiss herstellen lässt, ebenso lassen sich auch alle übrigen Farbenqualitäten aus diesen drei Grundfarben durch Mischung finden. Wenn nun die Netzhaut von weissem Lichte getroffen wird, so werden alle drei Fasergattungen, die roth-, grün- und violettempfindenden, erregt, und diese Gesammterregung ergibt die Empfindung Weiss. Ist die Netzhaut mit rothem Lichte erleuchtet, so werden die rothempfindenden Fasern am stärksten erregt. Es ist aber sehr wahrscheinlich, dass auch die beiden andern Fasergattungen, wenn auch schwach, miterregt werden, zunächst die grünempfindenden, weil Grün dem Roth im Spectrum näher liegt, und am schwächsten die violettempfindenden.

Das gelbe Licht erregt nach dieser Theorie mässig

stark die rothempfindenden und grünempfindenden Fasern zugleich, und schwach die violettempfindenden. Gelb ist also keine Grundfarbe, sondern physiologisch eine Mischfarbe, da es aus der Mischung der Roth- und Grünempfindung besteht.

Das grüne Licht erregt vorwiegend stark die grünempfindenden Fasern, und sehr schwach die roth- und violettempfindenden.

Das blaue Licht erregt wiederum gleichzeitig die grünempfindenden und violettempfindenden Fasern mässig stark, während es die rothempfindenden Fasern sehr schwach reizt. Blau ist daher auch physiologisch eine Mischfarbe.

Das violette Licht erregt besonders stark die violettempfindenden Fasern, und die beiden andern Faserngattungen nur schwach.

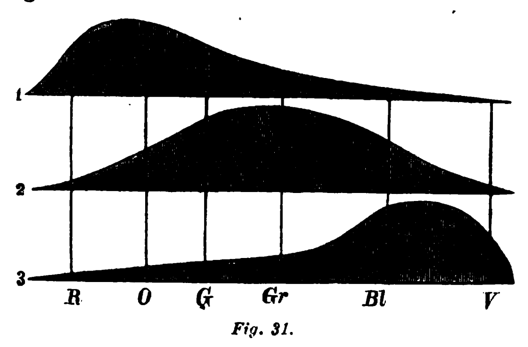



*Fig. 31.*

Diese Theorie der Farbenempfindung ist zuerst von dem Engländer Thomas Young ausgesprochen und in neuerer Zeit von Helmholtz weiter ausgebildet worden. Helmholtz hat die Wirkung der Spectralfarben auf die Netzhaut durch beistehende Fig. 31 nach der genannten Theorie versinnlicht.

Die horizontalen Linien 1, 2, 3 bedeuten die drei Nervengattungen, 1 die rothempfindenden, 2 die grünempfindenden, 3 die violettempfindenden Fasern. Die

Buchstaben unter der Linie 3 sind der Reihe nach die Spectralfarben Roth, Orange, Gelb, Grün, Blau, Violett. Ueber jeder Linie erhebt sich eine Curve, welche angibt, wie stark die entsprechende Nervengattung von allen Spectralfarben erregt wird. Die Curve 1 erreicht ihren Gipfel zwischen Roth und Orange, die Curve 2 hat ihren Gipfel im Grün, die Curve 3 im Blau und Violett. Zieht man von jeder Spectralfarbe aus eine senkrechte Linie durch alle drei Curven, so erkennt man an dem senkrechten Stück, das die Curven schneidet, wie stark die drei Nervengattungen davon erregt werden. Man sieht, dass Gelb in 1 und 2 mässig starke Erregungen ausübt, Grün in 2 stark, in 1 und 3 nur schwach erregt, Blau wiederum in 2 und 3 eine Erregung mittlerer Stärke erzeugt, Violett fast nur in 3 eine Erregung ausübt.

Eine sehr interessante Beobachtung liefert den Beweis dafür, dass besondere rothempfindende Elemente in der Netzhaut vorhanden sein müssen. Man kann sich nämlich sehr leicht davon überzeugen, dass die äussersten Ränder der Netzhaut ganz unempfindlich für die rothe Farbe sind. Man nehme einen rothen Körper, z. B. eine Stange rothen Siegellack in die Hand und führe ihn, während man mit dem Auge unverwandt geradeaus blickt, seitwärts hinter das Gesichtsfeld. Bewegt man ihn nun langsam nach vorn, bis er eben am Rande des Gesichtsfeldes bemerkbar ist, so erscheint er nicht roth, sondern schwarz, und die rothe Farbe taucht fast plötzlich auf, wenn man ihn noch weiter nach vorn bewegt. Nicht so verhält es sich mit Blau. Diese Farbe erkennt man am Rande des Gesichtsfeldes recht gut.

Die Netzhaut ist also an ihren Rändern blind für die rothe Farbe, und dies erklärt sich am einfachsten daraus, dass hier die rothempfindenden Fasern fehlen. Da diese Stellen der Netzhaut recht gut blau empfinden, so ermangeln sie nicht solcher Fasern, welche auch an den übrigen Netzhautstellen bei der Farben-

empfindung betheiligt sind. Gäbe es nun blos eine Nervenfaser, welche dazu bestimmt wäre, alle Farbenempfindungen zu vermitteln, so ist nicht einzusehen, weshalb diese nicht auch am Netzhautende Roth empfinden sollte; und daraus folgt, dass für Roth besondere Nervenfasern existiren müssen.

Was bei normalen Augen am Netzhautrande vorkommt, das breitet sich in den Augen vieler Menschen zur Rothblindheit aus. Es kommen nämlich ziemlich häufig Menschen vor, fast unter zwanzig einer, die nicht im Stande sind, rothe Farben gut zu unterscheiden. Sie wissen zwar aus dem Sprachgebrauch, dass man eine gewisse Farbe roth nennt, und bedienen sich je nach ihrer Erfahrung auch dieses Ausdrucks. Sie bezeichnen das Blut als roth, weil sie wissen, dass man es so nennt, oder andere Gegenstände, von denen ihnen dies bekannt ist, und daher kommt es, dass sie sich häufig ihres mangelnden Farbensinnes gar nicht bewusst sind. Aber früher oder später kommt eine Gelegenheit, bei welcher es sich herausstellt, dass sie nicht im Stande sind, einen rothgefärbten Gegenstand unter sonst gleichen andersfarbigen herauszufinden. Besonders verwechseln sie das Roth mit dem dunklern Grün und Gelb. Wenn man nun solchen Farbenblinden ein Spectrum zeigt, so unterscheiden sie darin hauptsächlich zwei verschiedene Farbenqualitäten, welche sie Blau und Gelb nennen. Vor allem erscheint ihnen das Spectrum am rothen Ende verkürzt, sie sehen das äusserste Roth gar nicht mehr.

Diese Eigenthümlichkeit lässt sich daraus erklären, dass bei solchen Personen die rothempfindenden Fasern des Sehnerven fehlen oder unerregbar sind. Ihnen muss die Welt in ganz andern Farben erscheinen als uns. Das was wir weiss sehen, muss für sie grünlichblau aussehen, da das Roth darin fehlt, und doch nennen sie dasselbe auch weiss, weil es eben die Gesammtheit ihrer ganzen Farbenreihe enthält. Uebrigens kommen verschiedene Grade von Rothblindheit vor, sodass

die Empfindlichkeit für Roth mehr oder weniger erhalten ist.

Dieser Zustand ist nun ein Beweis dafür, dass Roth eine der drei Grundfarben ist, da sie gänzlich fehlen kann, und zugleich eine wesentliche Stütze für die Young-Helmholtz'sche Theorie, nach welcher diesen drei Grundfarben besondere Nervenfasern in jedem Netzhautpunkte entsprechen.

---

## Sechstes Kapitel.

Die Nachbilder. — Das Stroboskop. — Positive und negative Nachbilder. — Die farbigen Nachbilder. — Harmonie der Farben.

Beim gewöhnlichen Sehen scheint uns ein Bild zu verschwinden, sobald der gesehene Gegenstand dem Blicke entzogen wird oder die Beleuchtung aufgehört hat. An einigen wohlbekannten Erscheinungen können wir aber die Bemerkung machen, dass der Lichteindruck immer einige Zeit die Lichtwirkung überdauert. Führen wir ein glimmendes Streichhölzchen schnell mit der Hand im Kreise umher, so erscheint es uns nicht als Punkt, sondern als ein feuriger Kreis. Ebenso macht eine steigende Rakete, eine fallende Sternschnuppe den Eindruck einer Lichtlinie. Ferner, wenn nachts das Dunkel durch einen Blitz erhellt wird, so haben wir die Empfindung, als ob die Erleuchtung eine Zeit lang gedauert habe, und doch dauert der Blitz nur einen verschwindend kleinen Moment, sodass selbst ein vorbeisausender Eisenbahnzug bei dieser Beleuchtung stillstehend erscheint. Unangenehm sind auch die Nachwirkungen des Lichts, wenn wir in ein blendendes Licht oder die Sonne gesehen haben. Wir nehmen dann noch eine

Zeit lang auch bei geschlossenen Augen Flecke wahr, die sehr störend beim Sehen sind.

Alle diese Nachwirkungen des Lichts nennt man Nachbilder. Man kann Nachbilder von allen nicht zu lichtschwachen Gegenständen beobachten, wenn das Auge empfindlich genug dafür ist, am besten vom hellen Fenster, wenn man die Augen schnell öffnet und schliesst. Wir bemerken dann noch einige Secunden ein lichtschwaches Fenster, das allmählich schwindet. Die Existenz der Nachbilder haben wir bereits stillschweigend vorausgesetzt bei der Erwähnung der rotirenden Scheiben, die aus schwarz und weissen oder farbigen Sectoren bestehen. Bei genügend schneller Rotation nehmen wir nicht mehr die einzelnen Sectoren wahr, sondern eine gleichmässige Mischung der in ihnen enthaltenen Lichter. Hier haben wir es mit der Erscheinung von Nachbildern zu thun; denn hat ein weisser Sector sich auf einer Netzhautstelle abgebildet, und folgt nun schnell genug ein schwarzer an derselben Stelle, so ist das Nachbild des weissen noch nicht geschwunden und combinirt sich daher mit dem schwarzen zu einem gleichmässigen Grau. Die Schnelligkeit der Umdrehungen muss daher eine gewisse Grösse erreichen, sodass, wenn ungefähr dreissigmal in der Secunde Weiss auf Schwarz gefolgt ist, gleichförmiges Grau auftritt. Bei geringerer Geschwindigkeit findet ein Flimmern zwischen Weiss und Schwarz statt, was dem Auge einen unangenehmen, unruhigen Eindruck macht. Noch lästiger wird dem Auge diese Empfindung beim Flackern eines Lichtes, was daher kommt, dass das Auge sich durch das abwechselnde Dunkel jedesmal ein wenig ausruht, und durch das einbrechende Licht immer wieder mit grösserer Heftigkeit gereizt wird.

Auf dem Principe der Nachbilder beruht ein wohlbekanntes Instrument, das Stroboskop. In diesem sieht man mannichfache Figuren in Bewegung, Tänzer, Reiter, Turner u. dgl. In Fig. 32 sehen wir dies an einem einfachen Beispiele erläutert. Auf der Scheibe

ist ein Pendel in verschiedener Lage seiner Schwingung gezeichnet. Man sieht durch die Löcher 1—12 in einen Spiegel und dreht die Scheibe mässig schnell. Nun erblickt man schnell hintereinander das Pendel in der Lage 1, dann 2, 3 u. s. w. bis 12, und es scheint daher, als ob der Pendel eine Schwingung mache. Hier dauert das Nachbild eines Pendels solange, bis das nächste an seine Stelle tritt.



*Fig. 32.*

Von der eben betrachteten Art der Nachbilder unterscheiden sich nun noch solche, welche entstehen, wenn man längere Zeit auf einen hellen Gegenstand gesehen hat. Blicken wir z. B. aus einiger Entfernung durch das Fensterkreuz eine halbe bis eine Minute lang nach dem hellen Himmel, ohne das Auge zu bewegen, sodass das Fensterkreuz sich auf einer bestimmten Stelle der Netzhaut abbildet, und wenden nun das Auge schnell gegen die Wand oder auf eine weisse Papierfläche, so erblicken wir ein dunkles Fenster mit hellem Fensterkreuz. In diesem Nachbilde erscheint alles Helle des Bildes dunkel, alles Dunkele hell, und man nennt es deshalb ein *negatives* Nachbild, während man die vorhin erwähnte Art der Nachbilder *positive* nennt.

Die negativen Nachbilder entstehen durch die Ermüdung der Netzhaut an derjenigen Stelle, wo das Licht in stärkerm Grade eingewirkt hat. Die helle Fläche des Fensters hat eine Zeit lang die Netzhaut erregt und infolge dessen in bestimmter Ausdehnung

ermüdet, während die Stellen, wo sich das dunklere Fensterkreuz abbildete, nicht ermüdet worden sind. Wenn hiernach das Auge sich auf eine andere Fläche hinwendet, so werden die ermüdeten Stellen von dieser schwächer erregt werden, und daher ein dunkles Fenster mit hellem Fensterkreuz auftauchen.

Sehr schön lässt sich ein ähnlicher Versuch in folgender Weise ausführen. Man lege ein kleines Quadrat aus schwarzem Papier auf einen Bogen weissen Papiers und fixire dasselbe längere Zeit mit einem Auge. Wenn man dann plötzlich den Blick auf die weisse Papierfläche wendet, so erblickt man darauf ein helles Quadrat, welches mit dem Auge sich mitbewegt und nach einiger Zeit allmählich verlischt. Das Mitwandern solcher Bilder in der Richtung des Blickes ist charakteristisch für dieselben, und gibt uns die Ueberzeugung, dass wir es nicht mit einer Wirklichkeit zu thun haben, sondern mit einer optischen Täuschung, die durch innere Vorgänge im Auge entsteht. Das Wunderbarste dabei ist, dass wir trotzdem in unserer Vorstellung die Ursache nach aussen hin verlegen, weil wir durch Erfahrung unbewusst dazu getrieben werden.

Die negativen Nachbilder können aber auch bei geschlossenen Augen wahrgenommen werden. Wenn wir nach dem Anblicken der hellen Gegenstände das Auge schliessen, so nehmen wir dieselben auch in dunklerer Schattirung wahr. Diese Thatsache erschien lange Zeit unerklärlich und unvereinbar mit der eben mitgetheilten Theorie der Nachbilder. Aber die sehr lehrreichen Untersuchungen von Purkinje zu Anfang dieses Jahrhunderts hatten schon gezeigt, dass für unser Auge ein absolutes Dunkel nicht existirt. In der tiefsten Finsterniss, selbst wenn man in dunkelster Nacht jede Spur von Licht künstlich auf das Sorgfältigste absperrt, bleibt dem Auge noch eine eigene Lichtempfindung, welche man das Eigenlicht der Netzhaut nennt. Die Empfindlichkeit des Auges steigert sich in diesem Dunkel ganz ungemein, und nun treten im dunkeln Gesichtsfelde

phantastische Lichtnebel auf, die auf- und niedersteigen, vergehen und sich wieder entwickeln. Es ist sehr wahrscheinlich, dass dieselben durch den innern Reiz entstehen, den der Blutkreislauf auf die Netzhaut ausübt.

Bei geschlossenen Augen bleibt also noch das Eigenlicht der Netzhaut bestehen, abgesehen von dem diffusen Lichte, welches bei Tage durch die Augenlider dringt, und es erklärt sich das negative Nachbild bei geschlossenen Augen zur Genüge daraus, dass die ermüdeten Netzhautstellen unempfindlicher für diese schwachen Lichtempfindungen werden.

Von grossem Interesse sind ebenfalls die farbigen Nachbilder, welche im Auge entstehen. Es ist sehr bekannt, dass es Farbenzusammenstellungen gibt, welche dem Auge angenehm und solche, die ihm unangenehm sind oder mindestens unschön vorkommen. Angenehme Combinationen sind Blau und Gelb, Roth und Grün in allen Schattirungen; hässlich sind Zusammenstellungen von Grün und Blau, Gelb und Grün und ihnen naheliegenden Nuancen. Man spricht daher auch von harmonischen und unharmonischen Farben, indem man einen Vergleich mit der Musik anstellt.

Wenn man in Bezug hierauf die Stellung der Farben im Spectrum beachtet, so findet man, dass harmonische Farben nahezu complementäre Farben sind, während unharmonische im Spectrum einander mehr oder weniger nahe liegen.

Damit ist nun aber die Frage nach der Ursache der Harmonie und Disharmonie wissenschaftlich noch nicht gelöst, und sie findet erst in den folgenden Versuchen eine befriedigende Lösung.

Wenn man längere Zeit auf eine grüne Fläche gesehen hat, und wendet nun das Auge auf eine weissliche Fläche, so erscheint sie einige Momente röthlich gefärbt. Diese Beobachtung bietet sich im gewöhnlichen Leben ziemlich häufig dar. Um ihr eine wissenschaftliche Form zu geben, lege man ein kleines Quadrat aus gesättigt grünem Papier auf einen Bogen weisses Papier, und

betrachte es mit einem Auge längere Zeit recht scharf. Dann blicke man auf das Weiss und nun sieht man auf demselben ein rothes Quadrat mit dem Auge umherwandern, das nach einiger Zeit erblasst.

Wie kommt dieses farbige Nachbild zu Stande? Es erklärt sich einfach daraus, dass durch das Grün nicht alle lichtempfindlichen Elemente der Netzhaut erregt werden, sondern nur die grünempfindenden, und dass also auch nur diese durch längeres Betrachten des grünen Papiers ermüdet werden. Blickt man danach auf eine weisse Fläche, so werden durch das Weiss alle empfindlichen Elemente der Netzhaut gereizt, die ermüdeten aber am schwächsten, und es tritt daher die complementäre Farbe hervor, in welcher das Roth überwiegt.

Die farbigen Nachbilder erscheinen immer in complementären Farben. — Hat man ein rothes Papier betrachtet, so sieht die weisse Fläche grünlich aus, die Einwirkung von Blau erzeugt ein gelbes Nachbild und umgekehrt, kurzum die betrachtete Farbe und das Nachbild sind immer so beschaffen, dass sie zusammen Weiss geben.

Diese Thatsachen sind eine bedeutende Stütze der jetzt angenommenen Farbentheorie. Sie erklären sich aus dieser mit Leichtigkeit dadurch, dass Roth hauptsächlich die rothempfindenden Nervenfasern erregt, Grün und Violett hauptsächlich die ihnen entsprechenden Nervenfasern, und dass die Erregung aller drei zusammen erst Weiss gibt.

Eine hierher gehörende Beobachtung, die man im gewöhnlichen Leben häufig macht, ist noch folgende. Wenn man einen Moment in die Sonne gesehen hat, so entstehen sehr starke, lange anhaltende Nachbilder. Diese sind immer farbig und wechseln häufig ihre Farbe. Das kommt daher, dass in dem weissen Sonnenlichte das Nachbild nicht für alle Farben gleichmässig und gleichzeitig schwindet, und wenn nun eine Farbe erlischt, so hört das Weiss des Nachbildes auf und es kommen die

übrigen Farben zum Vorschein, die unter mannichfachem Wechsel allmählich abklingen.

Man hat in der Kunst schon seit alter Zeit Farben und Töne miteinander verglichen, und wir haben bereits in diesem Sinne von der Harmonie der Farben gesprochen. Dieser Vergleich ist aber naturwissenschaftlich nur bis zu einer gewissen Grenze zulässig. Der Eindruck eines Farbengemisches und eines Accordes sind sich in ihrem Charakter sehr verschieden. Aus einem Accorde hört das geübte Ohr die einzelnen Töne heraus, das Ohr zergliedert ihn in seine Bestandtheile, eine Mischfarbe dagegen macht einen Eindruck als Ganzes und kann nur bis zu einem gewissen Grade durch ein erfahrenes Auge in einfache Farben zerlegt werden. Unmöglich aber wird es dem Auge, in dem Weiss die Grundfarben zu erblicken, so sicher wir auch wissen, dass sie darin enthalten sind, während in jeder Tonzusammenstellung die Töne ermittelt werden können.

---

## Siebentes Kapitel.

Die Bewegungen der Augen. — Das Sehen mit zwei Augen. — Einfachsehen und Doppeltsehen. — Die identischen Netzhautstellen. — Der Horopter.

Das Auge ist innerhalb der Augenhöhle einer grossen Beweglichkeit fähig. Da es selbst eine Kugelform besitzt und die Höhle, in der es liegt, eine entsprechende Hohlkugel bildet, so ist leicht einzusehen, dass die Drehung des Auges nach allen möglichen Richtungen auf diese Weise zu Stande kommen kann. Die Bewegungen der Augen gehen, wie wir aus Erfahrung wissen, mit grosser Schnelligkeit vor sich, und gestatten uns, unsere Aufmerksamkeit sehr schnell hintereinander

auf verschiedene Dinge zu richten. Weit schwerfälliger würde daher unser Benehmen sein, wenn die Augen im

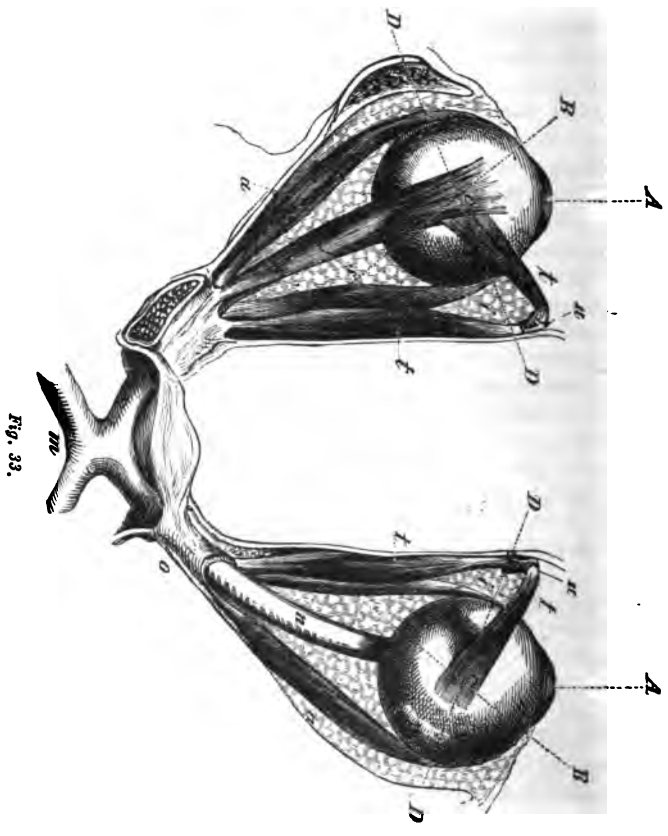


Fig. 33.

Kopfe fest wären und wir den Kopf immer dahin und dorthin wenden müssten.

In der Fig. 33* sehen wir die beiden Augen in der

* Helmholtz, Optik.

Augenhöhle liegend abgebildet, im Zusammenhange mit den Muskeln, die zu ihrer Bewegung dienen. Die Augenhöhlen sind von Knochenwänden eingeschlossen, und verengen sich nach hinten trichterförmig bis zu dem Sehnervenloch, wo der Sehnerv durchtritt. Die Höhle ist von einer Fettmasse ausgepolstert, in welcher vorn der Augapfel wie in einer Gelenkhöhle eingebettet liegt. Ausserdem liegen Nerven, Muskeln und Blutgefässe darin eingehüllt. Wir sehen in der Figur den Sehnerven *n* durch das knöcherne Loch bei *o* hindurchgehen, und vor seinem Durchtritt sehen wir bei *m* die kreuzförmige Verbindung beider Sehnerven, welche man das Chiasma nennt. Die Muskeln, welche zur Bewegung des Auges bestimmt sind, sind an dieses gleichsam wie die Zügel an den Kopf eines Pferdes angelegt. Sie entspringen fast alle von der Knochenwand rings um das Sehnervenloch, und gehen durch die Länge der Augenhöhle an den Augapfel heran. Es gibt vier geradelaufende Augenmuskeln, von denen einer sich oben einer unten ansetzt, ferner einer an der innern Seite und einer an der äussern Seite.

Es ist klar, dass der obere Muskel den Blick nach oben richtet, (durch Drehung um die Axe *D*) der untere nach unten, der innere nach innen und der äussere nach aussen. Da wir mit unsern beiden Augen beim gewöhnlichen Sehen immer denselben Punkt fixiren, so bewegen wir beide Augen gleichzeitig nach bestimmten Gesetzen. Blicken wir mit beiden Augen nach oben oder nach unten, so sind immer die gleichnamigen Muskeln dabei thätig. Blicken wir dagegen mit beiden Augen nach rechts, so geräth dabei am rechten Auge der äussere, am linken der innere Muskel in Thätigkeit, und entsprechend umgekehrt ist es, wenn wir nach links blicken. Wenden wir aber unsere Augen auf einen nahen Gegenstand nach innen, so geschieht dies durch die Zusammenziehung der beiden symmetrisch gelegenen innern Augenmuskeln, und wenn die Augen wiederum in die Ferne blicken, so werden sie durch die beiden äussern Augen-

muskeln der parallelen Richtung genähert. Weiter nach aussen als bis zur parallelen Stellung vermögen wir beide Augen zugleich nicht zu stellen.

So sehen wir, dass sich die Zusammenziehungen der Augenmuskeln mannichfach miteinander combiniren. Manchmal ziehen sich die symmetrisch gelegenen gleichnamigen Muskeln gleichzeitig zusammen, manchmal befinden sich die congruent liegenden Muskeln in gemeinschaftlicher Action. Alle diese Combinationen haben aber immer den Zweck, beide Augen denselben Punkt fixiren zu lassen, sodass sich die Augenaxen, die wir vom gelben Flecke aus durch die Mitte der Pupille ziehen, in dem fixirten Punkte schneiden. Niemals sind wir im Stande die beiden Augen so zu bewegen, dass sich die Augenaxen nicht treffen. Wir können z. B. nicht mit dem einen Auge nach oben, mit dem andern nach unten sehen, oder mit dem einen nach rechts und dem andern nach links.

Ausser den genannten vier geraden Muskeln gibt es noch zwei schiefe Muskeln, die in querer Richtung an dem Auge ziehen. Der eine liegt oben und innen (*t*) und hat einen gar merkwürdigen Verlauf. Er entspringt nämlich auch hinten am Sehnervenloch, geht dann nach vorn nicht direct an das Auge, sondern durch einen Ring bei *u*, wie eine Schnur, die über eine Rolle läuft, schlingt sich hier um und setzt sich quer an die obere Fläche des Augapfels an. Der zweite schiefe Muskel liegt auf der untern Seite des Augapfels und ist in der Figur verdeckt. Er entspringt an der innern Wand vorn in der Augenhöhle, geht unter dem Auge nach aussen und setzt sich dem obern schiefen Muskel (bei *v*) gegenüber an. Die zwei schiefen Muskeln befähigen das Auge, noch andere Bewegungen auszuführen, als durch die geraden Muskeln allein möglich wäre. Man sieht leicht an der Figur, dass die schiefen Muskeln im Stande sind, das Auge um eine Axe zu rollen (*B*), welche der Augenaxe sich nähert, und zwar beide nach entgegengesetzter Richtung.

Die Bewegungen unserer Augen, welche durch die combinirte Thätigkeit der genannten Muskeln in so mannichfacher Richtung und mit so grosser Präcision vor sich gehen, dienen nicht nur dazu die Bilder der Aussenwelt auf bestimmte Stellen der Netzhaut hinzulenken, sondern sie geben auch unsern Mienen Ausdruck und Leben. Das Auge ist es hauptsächlich, welches in unserm Gesichte die Zustände unseres Gemüthes und unserer Gedanken verräth, und zum grossen Theil geschieht dies durch die Stellung und Bewegung des Augapfel, zu denen sich freilich noch die Wirkung der Gesichtsmuskeln, der Augenlider, wol auch Accommodationsänderungen im Auge gesellen. Der trübe Blick senkt das Auge nach unten, der begeisterte hebt es nach oben; und so gibt die Seele, während sie durch das Auge von aussen geistige Nahrung erhält, ihre innern Vorgänge wiederum durch dasselbe Organ nach aussen hin kund.

Das Sehen mit einem Auge ist nur ein unvollkommenes. Das ganze Gesichtsfeld bildet sich auf der Netzhaut flächenartig ab wie ein Gemälde ohne ein directes Kennzeichen dafür, wie weit die Gegenstände von unserm Auge entfernt sind. Was wir mit einem Auge wahrnehmen, ist thatsächlich nur eine helle Fläche mit verschiedenen Lichtern, Schatten und Farben, auf der wir die Gegenstände in einer Ebene erblicken. Aber durch die Erfahrung haben wir indirecte Kennzeichen dafür, ob sich die Gegenstände nah oder fern befinden. Die Gegenstände, die wir ihrer Grösse nach kennen, werden wir für entfernt halten, wenn sie klein, und für nah, wenn sie gross aussehen. Wir wenden also auf das einäugige Bild die Gesetze der Perspective an, durch welche wiederum das Gemälde einen wirklichen Raum vortäuscht. Ausserdem müssen wir auf nahe Gegenstände stärker accommodiren um sie scharf zu sehen als auf ferne, und daraus können wir auch auf die Entfernung schliessen. Aber in Wirklichkeit sehen wir mit einem Auge doch nur eine

Fläche, keine Tiefendimension, und wir lassen uns nur durch im Leben gemachten Erfahrungen zu dem Eindruck verleiten, dass wir es mit einer räumlichen Welt zu thun haben. Wo uns diese Erfahrungen fehlen, gelangen wir daher nicht selten beim einäugigen Sehen zu sonderbaren Täuschungen. So kommt es z. B. vor, dass, wenn man im Freien nach dem Himmel sieht und ein kleines Insekt so nah vor einem Auge vorbeifliegt, dass man es mit dem andern nicht wahrnimmt, man einen grossen Vogel am Himmel zu erblicken glaubt. Folgenden Versuch kann man leicht anstellen. Man hänge einen Ring an einen Faden und lasse ihn von jemand in einiger Entfernung vorhalten, während man ein Auge schliesst, sodass man den Ring nur von der schmalen Seite sieht. Man versuche nun mit einem Stäbchen in den Ring hineinzustechen und man wird finden wie erstaunlich schwer es ist, ihn richtig zu treffen. Oeffnet man das andere Auge, so ist dies eine Leichtigkeit.

Das Sehen mit beiden Augen eröffnet unserm Geiste die dritte Dimension des Raumes, lässt ihn in die Tiefen der umgebenden Aussenwelt blicken. Wir würden zwar durch das Gefühl und die Bewegungen im Raume den Begriff desselben auch mit einem Auge kennen lernen, aber eine klare unmittelbare Anschauung desselben würde uns unbedingt fehlen.

Wir wollen nun das Sehen mit beiden Augen zunächst in seinen einfachsten Verhältnissen betrachten. Wenn wir einen bestimmten Punkt z. B. die uns zugewendete Tischecke fixiren, so fällt in beiden Augen die Ecke auf den gelben Fleck der Netzhaut und die beiden verlängerten Augenaxen schneiden sich in der Tischecke. Trotzdem wir nun in jedem Auge ein Bild desselben Punktes haben, so nehmen wir doch nur einen einzigen Punkt wahr und nicht zwei. Das ist das erste Räthsel auf welches wir in diesem Thema stossen. — Warum sehen wir mit beiden Augen einfach und nicht doppelt?

Eine bestimmte Antwort lässt sich auf diese Frage

noch nicht ertheilen, aber wir können wol sagen, dass das Combiniren der beiden Bilder zu einem eine Thätigkeit des Gehirns ist. Man hat zwar das Chiasma der Sehnerven mit dem Einfachsehen in Zusammenhang bringen wollen und hat geglaubt, dass hier eine Vereinigung von Nervenfasern stattfinde. Dies ist jedoch nicht der Fall und wir müssen uns auf die Vorstellung beschränken, dass das Gehirn unter gegebenen Bedingungen im Stande ist, die Erregungen der beiden Nerven in eine zu vereinigen, indem es die Ursachen derselben nach aussen hin an denselben Ort verlegt.

Wenn wir also die Ecke eines Tisches aus bestimmter Entfernung fixiren, so schneiden sich die beiden Augenaxen in diesem Punkte und bilden einen Winkel mit einander, den man Convergenzwinkel nennt. Wenn wir nun von der Tischecke aus den Blick an der sich entfernenden Tischkante entlang laufen lassen, so wird der Convergenzwinkel immer kleiner. Von der Grösse dieses Winkels haben wir ohne wissenschaftliche Messung freilich keine Ahnung, aber wir besitzen ein feines Gefühl für die Stellung unserer Augen und zwar vermöge derjenigen Muskeln, welche die Augen nach auswärts und einwärts rollen, und dieses Gefühl zeigt uns an, in welcher Entfernung sich der fixirte Punkt befindet. Wir nennen dieses Gefühl das Muskelgefühl, das in allen unsern Gliedern mehr oder weniger ausgebildet ist, wodurch wir alle unsere Bewegungen abmessen, das Gleichgewicht beim Gehen und Stehen aufrecht erhalten und mannichfache Geschicklichkeiten und Fertigkeiten erlangen.

Indem wir so den Durchschnittspunkt der Augenaxen gleichsam durch den Raum wandern lassen, erlangen wir Kenntniss von dessen Ausdehnung und den darin enthaltenen Entfernungen. Doch das allein ist noch nicht der ganze Vortheil, den wir durch das Sehen mit zwei Augen erreichen. Denn wir haben bisher nur von der Wahrnehmung des fixirten Punktes allein gesprochen, der sich im gelben Fleck der Netz-

haut abbildet. Die ganze Netzhaut aber nimmt an dem Sehacte Theil, und zwar nach dem Rande hin mit abnehmender Schärfe. Dadurch combiniren sich in unsern Augen auch die ganzen Netzhautbilder in eigenthümlicher Weise miteinander und erzeugen die körperliche Anschauung der Gegenstände. Wären in beiden Augen nur die Fixationspunkte empfindlich, so würden wir zwar Kenntniss von einem Körper dadurch erlangen, dass wir den Fixationspunkt über die Oberfläche desselben wandern lassen. Dies geschieht allerdings mit ziemlicher Geschwindigkeit, trotzdem würde uns die in die Augen springende unmittelbare Körperform entgehen. Denn fixiren wir möglichst ruhig einen Punkt eines Körpers, z. B. die Tischecke, so haben wir auch gleichzeitig die Empfindung einer körperlichen Wahrnehmung, indem wir das Bild des ganzen Tisches in uns aufnehmen.

Bevor wir auf den Vorgang des körperlichen Sehens näher eingehen, müssen wir eine Eigenschaft der beiden Netzhäute betrachten, die wir bisher nur für den gelben Fleck constatirt haben. Wenn ein Punkt des Gesichtsfeldes in beiden Augen auf den gelben Fleck fällt, so nehmen wir ein einfaches Bild desselben wahr. Diese Eigenschaft, die Bilder zu vereinigen, dehnt sich aber auf die ganze Netzhaut aus, denn beim gewöhnlichen Sehen erscheint uns ja das ganze Gesichtsfeld einfach und nicht doppelt.

Man nennt nun solche Punkte der beiden Netzhäute, welche im Stande sind ihre Bilder zu vereinigen, identische oder correspondirende Punkte. Es ist leicht einzusehen, wie diese Punkte zueinander liegen werden. Nehmen wir im Gesichtsfelde einen Punkt rechts an, so wird dieser Punkt im rechten Auge sich auf der innern Netzhauthälfte abbilden, im linken Auge dagegen auf der äussern Netzhauthälfte. Wenn es daher möglich ist, diesen Punkt einfach und nicht doppelt zu sehen, so muss die äussere linke Netzhauthälfte und die innere rechte correspondirende Punkte miteinan-

der gemein haben. Ueberhaupt sieht man ein, dass die oberen Netzhauthälften und die unteren sich einander entsprechen müssen, ebenso die beiden rechten und die beiden linken Hälften, denn das ganze obere Gesichtsfeld bildet sich in beiden Augen unten, das untere oben, das linke rechts, das rechte links ab. Daraus geht dann hervor, wie wir die correspondirenden Punkte finden, wenn wir die beiden Netzhäute in ihrer natürlichen Lage aufeinander gelegt denken. Die sich deckenden Stellen sind correspondirend, wie die Punkte *a b c* (Fig. 34) auf den beiden Halbkreisen, welche die rechte und linke Netzhaut vorstellen sollen.

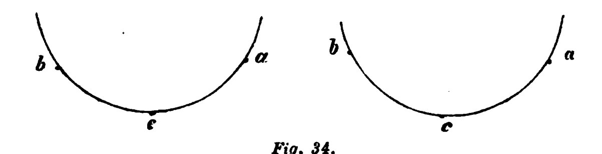


*Fig. 34.*

Es lässt sich leicht zeigen, dass wir in der That Doppelbilder wahrnehmen, wenn die Bilder auf nicht correspondirende Stellen der Netzhaut fallen. Wenn wir in einigem Abstande den Finger vor die Augen halten, sodass wir dahinter einen entferntern Gegenstand, das Fenster oder die Lampe, erblicken, dann wird uns der Finger doppelt erscheinen, sobald wir den entferntern Gegenstann fixiren, und letzterer wird doppelt erscheinen sobald wir den Finger fixiren.

In Fig. 35 sind die beiden Augen in derjenigen Lage abgebildet, in welcher sie den Finger *f* fixiren, dessen Bild sich in *c* in der Netzhautgrube befindet, und einfach gesehen wird. Dagegen nehmen die Augen den entferntern Gegenstand *g* doppelt wahr, denn er bildet sich in $g_1$ und $g_2$ ab, zwei Punkte von denen der eine rechts der andere links von *c* liegt, die also nicht miteinander correspondiren können. Wir erblicken dann die beiden Bilder von *g* zu beiden Seiten von *f*

in $G_1$ und $G_2$, und zwar undeutlich während $f$ deutlich ist. Schliessen wir das rechte Auge so verschwindet das auf derselben Seite befindliche Bild $G_2$, bei Schluss des linken Auges verschwindet $G_1$. Die beiden Netzhautstellen $g_1$ und $g_2$ vermögen also unter keinen Umständen die Wahrnehmung eines einfachen Punktes im Gesichtsfelde zu vermitteln.

Fig. 35.

Wir gehen nun zur Fixirung des Gegenstandes $g$ über und sofort erscheint der Finger doppelt (Fig. 36). Es fällt jetzt $g$ auf die identischen Mittelpunkte $c$ und wird einfach gesehen. Im rechten Auge bildet sich $f$ rechts von $c$ bei $f_2$ ab, im linken links von $c$ bei $f_1$. Beide Bilder verlegen wir nach den entgegengesetzten Seiten nach $F_1$ und $F_2$. Sie fallen auf nicht correspondirende Stellen und müssen doppelt gesehen werden. Schliessen wir das rechte Auge, so verschwindet das linke Bild, und umgekehrt.

Aus der Lage der correspondirenden Punkte in den beiden Netzhäuten lässt sich für alle Stellungen der Augen durch Construction finden, ob ein Punkt des Gesichtsfeldes auf correspondirende Punkte fällt oder nicht, ob er also einfach gesehen wird oder nicht.

Es gibt nur einen Fall, in welchem alle Punkte

des Gesichtsfeldes einfach gesehen werden. Das tritt ein, wenn sich das Gesichtsfeld in sehr grosser Entfernung befindet. Blicken wir z. B. nach dem unendlich weit entfernten Sternenhimmel, und fixiren wir einen Stern, so erscheinen uns alle andern Sterne ein-

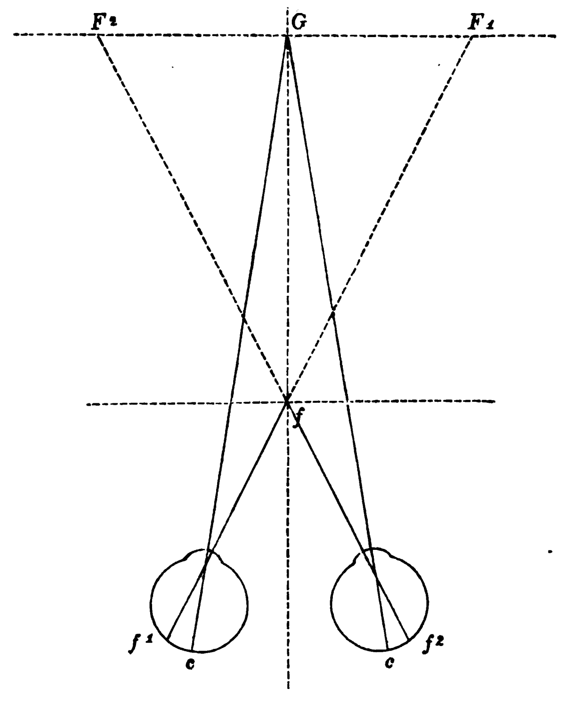



Fig. 36.

fach und nicht doppelt. Während die beiden Augen (Fig. 37) vom fixirten Sterne die beiden Strahlen *1* in paralleler Richtung auffangen, fallen von einem rechts befindlichen Stern die Strahlen *2* ebenfalls parallel ins Auge und treffen die Netzhaut in *a*, *a*. Da diese Punkte gleich weit von *c* nach derselben Richtung hin entfernt

liegen, so erzeugen sie ein einfaches Bild. Die Gegenstände am Horizont oder eine weit entfernte Landschaft von der Höhe eines Berges gesehen, verhält sich annähernd ebenso, da die Convergenzwinkel der beiden Augen in diesen Fällen sehr unbedeutend sind.

Sobald wir aber unsere Augen aus dem Anschauen grosser Ferne in die Nähe zurückwenden, so compliciren sich die Verhältnisse, unter denen wir einfach und doppelt sehen. Von Johannes Müller ist ein besonders interessanter Fall der Art zuerst genauer untersucht worden. Wenn wir (Fig. 38) mit beiden Augen einen in der Mittelebene befindlichen Punkt $C$ fixiren, so convergiren die Augenaxen, und $C$ bildet sich in dem Centrum $c$ ab. Wir construiren nun einen Kreis, welcher durch $C$ und die Knotenpunkte der beiden Augen $k$ hindurchgeht und können beweisen, dass alle Punkte des Raumes, welche auf dieser Kreislinie liegen, einfach gesehen werden. Nehmen wir einen Punkt $A$ daselbst an, und ziehen dessen Sehstrahlen $A\ k\ a$ nach beiden Augen, welche die Netzhaut in $a$ treffen, so sind die Winkel $c\ k\ a$ in beiden Augen dieselben, weil sie den beiden Peripheriewinkeln $A\ k\ C$ gleich sind. Es liegt also $a$ gleich weit von $c$ nach derselben Seite in beiden Augen, die daher den Punkt $A$ einfach sehen müssen.

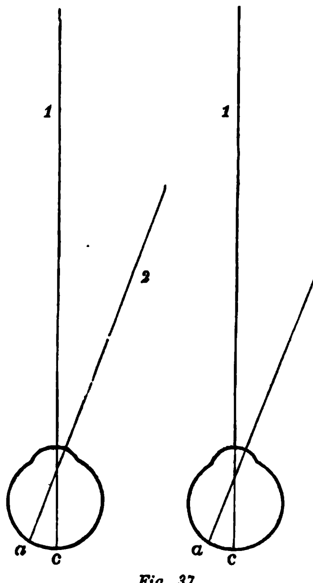


Fig. 37.

Man kann sich von der Richtigkeit dieser Construction durch folgenden Versuch überzeugen.

Man nehme zwei Schreibfedern, halte die eine in der Lage *C* fest vor beiden Augen und fixire sie. Nun bewege man die andere in der Linie *x y*, so wird man wahrnehmen, wie sie nach *x* und *y* zu bewegt Doppelbilder erzeugt, und dass es einen Punkt *A* gibt, in welchem sie einfach erscheint.

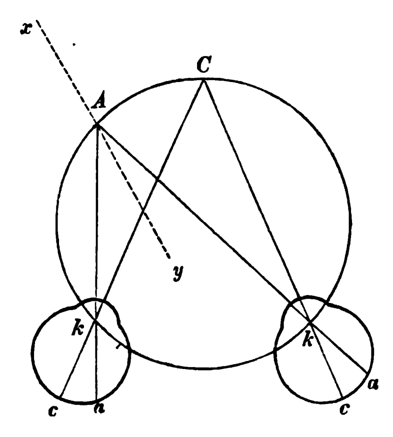



*Fig. 38.*

Man nennt diejenige Figur im Raum, in welcher alle Punkte ein einfaches Bild geben den Horopter, welcher in dem betrachteten Falle eine Kreislinie bildet. Man hat ausserdem gefunden, dass zu dieser Kreislinie noch eine gerade Linie hinzukommt, welche in der Figur durch den fixirten Punkt *C* senkrecht durch die Kreisfläche zu ziehen ist. Auch von dieser lässt es sich durch Construction zeigen, dass ihre Punkte einfach erscheinen.

Für andere Augenstellungen hat man complicirtere Horopterfiguren construirt, auf die wir nicht näher eingehen wollen. Interessant ist nur noch der Fall, in

welchem wir bei aufrechter Körperstellung in die Ferne blicken. Dann bildet, wie Helmholtz nachgewiesen hat, der Fussboden nahezu eine Horopterfläche. Wenn man bedenkt, mit welcher Sicherheit wir ohne den Erdboden zu fixiren vorwärts schreiten, so erscheint jenes Verhalten der Augen nicht ohne Bedeutung, denn viel leichter straucheln wir, wenn wir beim Gehen einen in gleicher Höhe mit dem Auge vorgehaltenen Gegenstand fixiren.

---

## Achtes Kapitel.

Das körperliche Sehen. — Das Stereoskop. — Das Telestereoskop. — Das pseudoskopische Sehen. — Die Wahrnehmung des Glanzes. — Der Wettstreit der Sehfelder.

Obgleich wir durch Versuche die Existenz von Doppelbildern beim Sehen mit beiden Augen nachweisen können und zeigen können, dass nur beschränkte Theile des Raumes einfache Bilder geben, so haben wir doch beim gewöhnlichen Sehen von der Existenz solcher Doppelbilder gar kein Bewusstsein. Ein flüchtiger Blick, den wir in das Zimmer oder aus dem Fenster auf die Strasse werfen, überzeugt uns, dass wir keinen Gegenstand doppelt gesehen haben, sondern alles einfach. Ja noch mehr, wir haben auch erkannt, dass wir in einen Raum hineinsehen, in welchem sich Gegenstände in verschiedener Entfernung von uns befinden, und nicht etwa auf eine Fläche. Wir gewinnen durch das Sehen mit beiden Augen Anschauung des Raumes und den Eindruck des Körperlichen.

Die Bedingung, unter welcher wir mit Hülfe beider Augen die Anschauung des Raumes erhalten, lässt sich durch eine einfache Betrachtung leicht herausfinden. Wenn wir z. B. im Zimmer einen Gegenstand so ins Auge fassen, dass wir dahinter die Wand erblicken,

so verdeckt er uns eine bestimmte Stelle derselben. Diese Stelle ist aber für beide Augen nicht genau dieselbe, sondern sie liegt für das rechte Auge weiter nach links hin und für das linke Auge weiter nach rechts, und wenn wir abwechselnd schnell hintereinander mal das rechte und mal das linke Auge schliessen, so scheint uns der Gegenstand vor der Wand hin und her zu schwanken. Daraus geht hervor, dass die Netzhautbilder der beiden Augen unmöglich genau dieselben sein können, vielmehr müssen die Gegenstände ineinander verschoben erscheinen.

Die Verschiedenheit der beiden Netzhautbilder wird natürlich keine willkürliche sondern eine ganz bestimmte und gesetzmässige sein. Wir können uns denken, dass wir einen Raum von zwei verschiedenen Standpunkten aus erblicken, und werden dann zwei Bilder erhalten, welche stark gegeneinander verschoben erscheinen. In geringerm Grade ist dies auch beim Sehen mit zwei Augen der Fall, da das rechte Auge einen andern Standpunkt im Kopfe hat als das linke.

Das Gesetz, nach welchem die Verschiebung der gesehenen Gegenstände hierbei stattfindet, haben wir oben für einen speciellen Fall bereits angewendet. Im allgemeinen wird von zwei hintereinander befindlichen Gegenständen der nähere Gegenstand gegen den entferntern vom rechten Auge mehr nach links vom linken mehr nach rechts verlegt.

Für ein grosses mit vielen Gegenständen erfülltes Gesichtsfeld ist es sehr schwer durch Construction die Richtung und Grösse der Verschiebung für die beiden Netzhautbilder zu finden. Für einen einfachen Körper aber gelingt dies schon leichter. Nehmen wir als Beispiel eine vierseitige oben abgestumpfte Pyramide, welche wir von oben her betrachten, so erscheint sie uns im allgemeinen so wie sie Fig. 39 darstellt (*P*). Aber wenn wir sie nur mit dem rechten Auge anblicken, wird das Quadrat der Spitze nach links verschoben sein wie in *r*, und betrachten wir die

Pyramide nur mit dem linken Auge, so wird jenes Quadrat wie in *l* nach rechts verschoben sein. Dabei ist natürlich vorausgesetzt, dass man den Kopf senkrecht über der Pyramide so einstellt, dass seine senkrechte Mittelebene (Medianebene) mit der Mitte *P* zusammenfällt.

Wenn nun die Pyramide mit beiden Augen zugleich angeschaut wird, so ist klar, dass das rechte Auge das Bild *r* empfängt, das linke dagegen das Bild *l*, die

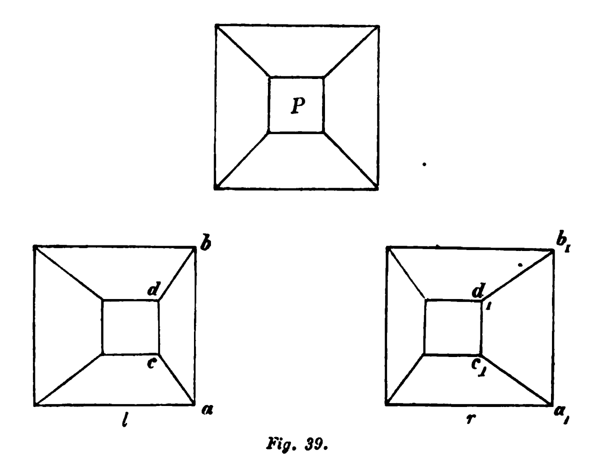



*Fig. 39.*

voneinander verschieden sind, und die Erfahrung lehrt, dass beide Bilder zu einem gemeinsamen körperlichen Bilde verschmelzen.

Der berühmte Naturforscher Wheatstone hat zuerst den Beweis geliefert, dass die Verschiedenheit der Netzhautbilder, welche sich für das rechte und linke Auge ergeben, diejenige Bedingung ist, auf der das körperliche Sehen beruht. Er construirte ein Stereoskop sehr einfacher Art, in welchem zwei Zeichnungen in folgender Weise betrachtet wurden. Man sieht mit den beiden Augen *R* und *L* (Fig. 40) gegen zwei Spiegel

*s* und *s*, welche beide schräg vor den Augen stehen und einen rechten Winkel miteinander bilden. In *r* befindet sich eine Zeichnung, z. B. eine von den Pyramiden, wie sie dem rechten Auge erscheint, in *l* das entsprechende Bild für das linke Auge. Nach den Gesetzen der Spiegelung erblickt nun jedes Auge das für dasselbe bestimmte Bild in der Verlängerung der Sehrichtung wo beide Bilder in ein körperliches Bild verschmelzen. Wir glauben einen Körper zu sehen, weil jedes Auge ein solches Bild erhält, als wenn die Strahlen von einem wirklichen Körper kämen.

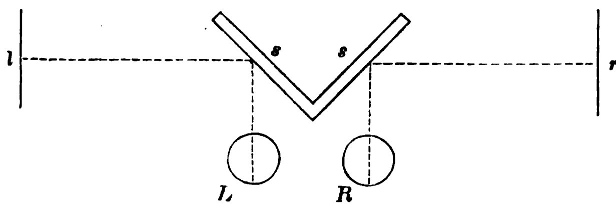



*Fig. 40.*

Das Wheatstone'sche Stereoskop ist von dem Brewster'schen verdrängt, welches jetzt in aller Händen ist. Die äussere Form desselben ist genügend bekannt. Sein wesentlichster Theil besteht aus zwei Prismen (Fig. 41) *s* und *s*, durch welche die beiden Augen *R* und *L* hindurchsehen. Die beiden Bilder *r* und *l* entsprechen wiederum je dem rechten und dem linken Auge. Der Strahl *a b* vom rechten Bild wird durch das Prisma so gebrochen, als wenn er von *c* her käme, der entsprechende Strahl des linken Bildes wird in derselben Weise gebrochen und kommt scheinbar auch von *c* her. Beide Bilder werden daher in *p* vereinigt, wo jedes Auge das ihm entsprechende Bild zu erblicken glaubt und so verschmelzen beide zu einem körperlichen Bilde.

Bei der Herstellung stereoskopischer Bilder hat bekanntlich die Photographie ausserordentliche Dienste

geleistet. Zwei photographische Kammern an Stelle der Augen erzeugen genau zwei solche Bilder, wie wir sie in Wirklichkeit sehen, und dies gelingt nicht nur mit einem einfachen Körper, sondern auch mit einer grossen Anzahl von Körpern im Raum, die sich zu einem beliebigen Bilde gruppiren. Der Eindruck des Körperlichen, den wir durch das Stereoskop erhalten, ist daher immer ein sehr frappanter.

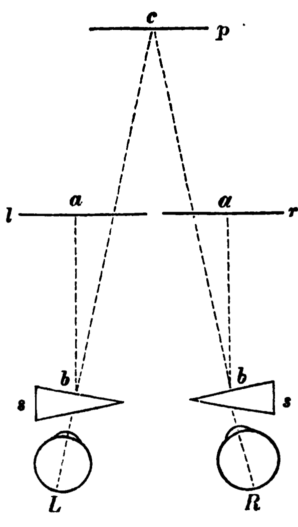


Fig. 41.

Auch ohne Instrument gelingt es stereoskopisch zu sehen, wenn man die Augenaxen parallel stellt, so dass das rechte Auge direct das rechte und das linke Auge das linke Bild fixirt. Man muss sich dann so anschicken, als wollte man durch das Bild hindurch nach einem entfernten Gegenstande sehen. Um dies einzuüben, bringe man in der Mitte beider Bilder ein kleines Loch an, und halte das Bild so vor die Augen, dass jedes derselben durch ein Loch nach ein und demselben entfernten Gegenstand sieht. Wenn man sich nun bemüht, mit beiden Augen diesen Gegenstand zu fixiren und ihn einfach zu sehen, was leicht gelingt, so bemerkt man, dass auch zugleich die beiden Bilder sich übereinander schieben und zu einem stereoskopischen Bilde vereinigen.

Beim Anblick eines stereoskopischen Bildes lassen wir den Blick, d. h. die Fixationslinie beider Augen, auf dem Gesichtsfelde ebenso wandern, wie wir dies beim gewöhnlichen Sehen thun, und da wo sie sich schneiden, liegt in dem scheinbaren körperlichen Bilde der

fixirte Punkt. Sehen wir auf nähere Gegenstände, so convergiren die Augen, sehen wir auf entferntere, so divergiren sie. Wenn wir z. B. bei der Pyramide (Fig. 39) die Basis $a\ b$ und $a_1\ b_1$ betrachten, und nun den Blick auf die nähere Kante $c\ d$ und $c_1\ d_1$ richten, so rückt die Fixationslinie des rechten Auges von $a_1\ b_1$ nach $c_1\ d_1$, die Fixationslinie des linken Auges aber um ein viel kleineres Stück von $a\ b$ bis $c\ d$, und daher müssen beide Linien convergenter geworden sein. Daraus entspringt das Gefühl, als ob wir vom Beschauen eines entferntern Punktes zu dem eines nähern übergegangen wären.

Das Umherwandern des gemeinsamen Fixationspunktes beider Augen, in welchem sich die beiden Fixationslinien schneiden, ist ein sehr wichtiges Mittel zur Schätzung der Entfernungen und zum Verständniss des gesehenen Raumes, und spielt offenbar auch beim Betrachten stereoskopischer Bilder eine Hauptrolle. Man könnte daher meinen, dass die körperliche Wahrnehmung überhaupt dadurch entstehe, dass wir durch schnelle Augenbewegungen den ganzen Raum gleichsam absuchen und so seine Dimensionen kennen lernen. Doch so wichtig auch dieser Umstand unstreitig ist, so kann doch die körperliche Wahrnehmung auch ohne Augenbewegungen zu Stande kommen. Bei momentaner Beleuchtung durch den Blitz oder den elektrischen Funken sieht man die Gegenstände auch körperlich, während die Augen nicht Zeit gehabt haben eine Bewegung auszuführen. Noch genauer erweisen dies Versuche von Dove, in welchen stereoskopische Bilder bei momentaner elektrischer Beleuchtung betrachtet wurden. Der Eindruck ist, wenigstens im Bereich des deutlichen Sehens in der Mitte des Gesichtsfeldes sehr häufig ein durchaus stereoskopischer, während die seitlichen Partien des Gesichtsfeldes wegen ihrer Undeutlichkeit nicht beurtheilt werden konnten.

Sehr merkwürdig ist es nun, dass in diesem Versuche auch keine Doppelbilder gesehen werden, ebenso wenig

wie beim gewöhnlichen Sehen, obgleich doch solche vorhanden sein müssen. Doppelbilder erscheinen also nur dann, wenn wir bei längerm Betrachten unsere Aufmerksamkeit auf dieselben richten. Bei momentaner Beleuchtung ist letzteres nicht möglich und beim gewöhnlichen Sehen ist unsere Aufmerksamkeit davon abgelenkt.

Es geht daraus hervor, dass beim körperlichen Sehen die Doppelbilder zu einem gemeinsamen Bilde verschmelzen, dass dies aber nicht etwa durch eine Eigenschaft der beiden Netzhäute oder des Sehnerven bedingt sei, sondern nur von der Intention des Sehenden abhängt, denn wenn wir wollen, können wir die Doppelbilder wahrnehmen, vorausgesetzt dass wir Zeit haben, unsere Aufmerksamkeit darauf zu lenken. Das gemeinsame Bild entsteht auch nicht etwa dadurch, dass wir eins der beiden Bilder für das rechte oder das linke Auge vernachlässigen und nur das andere bemerken, sondern es treten beide in der Vorstellung zusammen. Wir haben es hier mit einem Acte der Seele zu thun, den wir physiologisch noch nicht zergliedern können, doch müssen wir hinzufügen, dass dieses Vorstellungsvermögen nur aus der Erfahrung erworben sein kann, und dass es gewiss nicht vorhanden wäre, wenn wir nicht vorher durch tausendfache Uebung den Raum in seiner Tiefendimension kennen gelernt hätten. Dies geschieht aber vorzüglich durch die Augenbewegungen, die wir unablässig vornehmen und durch die wir die Entfernung der Gegenstände abschätzen.

Die Verschmelzung der Doppelbilder trägt zur Wahrnehmung des Körperlichen wesentlich bei. Da beide Bilder ungleich sind, und da wir mit beiden Augen von einem Körper einen grössern Theil seines Umfangs wahrnehmen als mit einem Auge, so kann das Gesehene nicht eine Fläche sein, sondern ist nach unserer Erfahrung ein Körper.

Die stereoskopischen Bilder haben uns die Gesetze, nach welchen die körperliche Wahrnehmung vor sich geht genauer kennen gelehrt. Die Wahrnehmung der vier-

kantigen Pyramide in Fig. 39 erklärt sich durch die Verschiedenheit der beiden gesehenen Bilder. Daraus ergibt sich leicht, wie die Bilder aussehen müssten, wenn wir von der Basis aus in das Innere einer vierkantigen Pyramide hineinsehen würden. Wir haben nichts weiter nöthig,

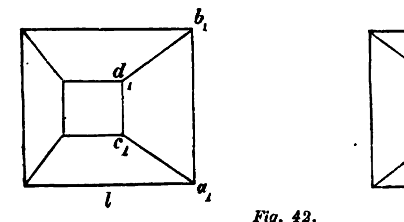



*Fig. 42.*

als die beiden Bilder miteinander zu vertauschen, wie dies in Fig. 42 geschehen ist. Das rechte Auge sieht das Bild $r$, in welchem die entfernte Spitze der Pyramide nach rechts verschoben erscheint, das linke die Figur $l$, in welchem die Verschiebung nach links stattgefunden hat. Der stereoskopische Eindruck beider Bilder besteht darin, dass wir in einen Hohlkörper hineinzusehen glauben.

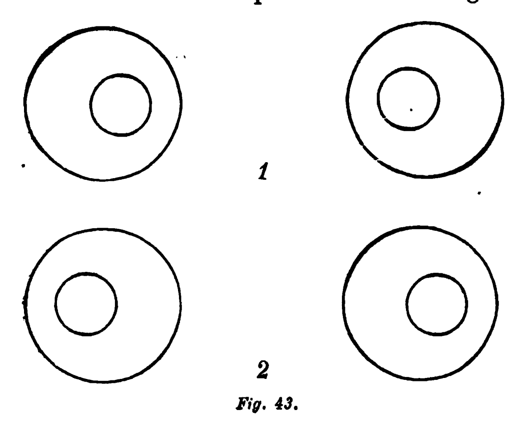



*Fig. 43.*

Ganz ebenso verhält es sich mit den nebenstehenden Figuren (Fig. 43). Die erste erscheint wie ein abgestumpfter

Kegel, dessen Spitze uns zugewendet ist, die zweite wie ein solcher, in welchen wir von der Basis aus hineinsehen. Wenn man durch eine einfache Vorrichtung in einer solchen Zeichnung den innern Kreis aus der Stellung *1* in die Stellung *2* übergehen lässt, so kann man die Umwandlung des einen Körpers in den andern direct beobachten.

Nach diesem Versuche ist es klar, dass bei Vertauschung zweier beliebiger stereoskopischer Bilder stets Aehnliches stattfinden muss; d. h. alle Erhabenheiten müssen sich in Vertiefungen verwandeln und umgekehrt. Bei einfachen Körpern geben diese Umkehrungen, welche man pseudoskopische Bilder nennt, einen Sinn. Eine Kugel verwandelt sich in eine Hohlkugel, ein Hautrelief in ein Basrelief. Aber in einem complicirten Bilde, einer Landschaft, Strasse u. s. w. entsteht durch die Umkehrung ein sinnverwirrender Eindruck. Es sieht aus, als ob alle Gegenstände, Menschen, Bäume u. s. w. in einer Vertiefung des Bodens stünden und doch bleibt alles an seinem Platze. Daher erscheinen die nahen Gegenstände sehr gross, weil wir sie in die Entfernung versetzen, die entferntern kleiner, weil sie scheinbar nahe liegen.

Sehr interessant ist die Wirkung des Telestereoskop von Helmholtz. Es verschafft uns von entferntern Objecten eine stärkere stereoskopische Anschauung als wir durch unsere Augen gewinnen können. Die beiden Augen $r$ und $l$ schauen in zwei Spiegel $s$ (Fig. 44), welche wie beim Wheatstone'schen Stereoskop schräg vor die Augen gestellt sind. Seitwärts in einiger Entfernung stehen ihnen nahezu parallel zwei andere Spiegel $s_1$. Die Strahlen fallen von einem entfernten Körper auf letztere, von dort auf die ersten Spiegel und gelangen durch diese in die Augen. Das hat aber die Wirkung als ob unsere Augen an Stelle der beiden Spiegel $s_1$ stünden und eine grosse Entfernung voneinander hätten. Denken wir uns zwei Augen von solchem Abstande in einem Riesenkopfe, so werden sie offenbar von einem entfernten Körper einen grössern Theil seines Umfanges sehen als zwei gewöhnliche Augen

und dies ruft einen stärkern stereoskopischen Effect hervor. Aus der Figur erkennt man, dass von einer Kugel *k* durch die Augen nur der Abschnitt *a c a* wahrgenommen werden wird, durch das Instrument aber der grössere Abschnitt *b a c a b*, weil die Strahlen von *b*

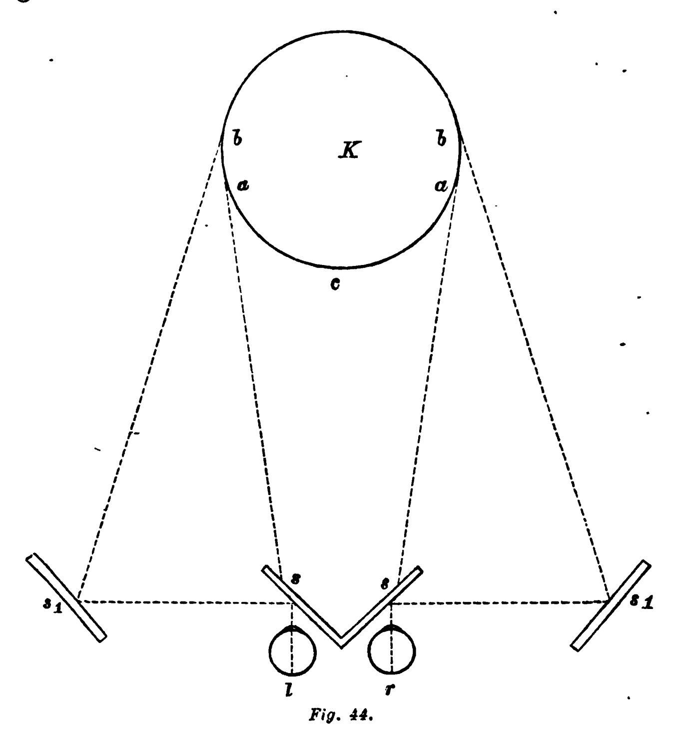



*Fig. 44.*

durch die Spiegel $s_1$ nach den Spiegeln *s* hin reflectirt werden. Eine Landschaft auf diese Weise betrachtet erscheint uns daher näher gerückt, weil wir für gewöhnlich nur an den nahen Gegenständen einen so grossen Theil der Oberfläche erblicken wie hier, und da die scheinbare Grösse der Gegenstände dieselbe bleibt, so

Kegel, dessen Spi… Modells, in welchem die
solcher, in … Eindruck …
Wenn ma… stereoskopischen Erscheinungen hat
chen Zei… Erklärung des Glanzes geführt. Der
Stellun… auf solchen Oberflächen, welche spiegeln,
lung … glatt und gleichartig sind. Ganz ruhi-
N… spiegelt vollkommen und glänzt nicht, sowie
sch… Wellen entstehen so nimmt es Glanz an.
A… leichte … weil jede einzelne Faser spiegelt, aber
… Seide glänzt, … keine spiegelnde Ebene bilden. Nun hat
sie … beobachtet, dass wenn man zwei gleiche Bilder
durch das Stereoskop betrachtet, von denen das eine
schwarz, das andere weiss ist, wie in Fig. 45, durch



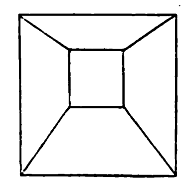


*Fig. 45.*

die Vereinigung der Eindruck des Glanzes entsteht. Man erklärt sich diese Erscheinung folgendermassen. Eine bestimmte Stelle einer glänzenden Oberfläche kann beiden Augen nicht gleich hell erscheinen, denn sie reflectirt nach verschiedenen Richtungen nicht die gleiche Menge von Licht. Man erkennt dies in grösserm Masse daran, dass der Glanz auf der Oberfläche wandert, wenn man den Kopf bewegt. In dieser Eigenthümlichkeit beruht zum grossen Theil das Wesen des Glanzes. Nun geschieht aber dasselbe beim Anblick jener Bilder, die das eine Auge weiss, das andere zugleich schwarz sieht. Es tritt keineswegs eine Vereinigung zu einem gleichmässigen Grau ein, sondern es entsteht ein W e t t s t r e i t d e r S e h f e l d e r, sodass stellenweise mal hell mal dunkel hervortritt, und die

Empfindung des Glanzes hervorruft. Während die Abwechselung von hell und dunkel an derselben Netzhautstelle eines Auges ein uns unangenehmes Flackern oder Flimmern erzeugt, was wir durch die Ermüdung erklärt haben, ist uns die abwechselnde Wahrnehmung von hell und dunkel in beiden Augen, die den Glanz erzeugt, offenbar eine angenehme Empfindung. Hierbei findet keine intermittirende Reizung der Netzhäute statt, wie beim Flackern, sondern es wandert die Aufmerksamkeit zwischen den beiden Gesichtsfeldern hin und her, und diese Abwechslung scheint es zu sein, welche uns ergötzt. Die Freude am Glänzenden, die dem Menschenkinde angeboren ist, dauert nur so lange als der glänzende Körper jene wechselnden Lichter dem Auge zusendet; sie hört auf, wenn sich seine Oberfläche vollkommen glättet und als Spiegel die nackte Wahrheit zurückstrahlt.

Es ist sehr frappant, wie getreu in den photographischen Stereoskopen der Glanz wiedergegeben wird. Der Glanz der untergehenden Sonne auf der gekräuselten Meeresoberfläche, der Glanz von Marmorsäulen, alles erscheint auf dem Bilde wie in der Wirklichkeit, und doch sehen wir auf jedem einzelnen Bilde mit blossem Auge nur dunkle und helle Stellen, die nie den Eindruck des Glanzes machen können. Wenn wir aber genau zusehen, so bemerken wir, dass auf dem einen Bilde manche Stelle hell ist, die auf dem andern dunkel aussieht. Ihre Combination ist es, welche den Glanz hervorruft.

Der Wettstreit der Sehfelder, welchen wir vorhin erwähnt haben, tritt noch stärker zum Vorschein, wenn wir statt schwarz und weiss den Augen zwei Farben darbieten, z. B. blau und roth. Wir sehen dann keine reine Mischfarbe, wie man vielleicht vermuthen möchte, sondern ein nebelartiges Wechseln beider Farben, welches hin- und herwandert. Stellenweise taucht darin auch die Mischfarbe auf, und das Ganze nimmt ein etwas glänzendes Aussehen an.

Den Wettstreit der Sehfelder kann man auch hervorrufen, wenn man zwei verschiedenfarbige Gläser vor die Augen setzt und nach einer weissen Fläche sieht. Es zeigt sich in der Abwechslung der Farben keine Gesetzmässigkeit, sondern es taucht regellos die eine Farbe in der andern inselartig auf. Einige Beobachter geben aber auch an, dass sie willkürlich mal die eine und andere Farbe sehen können, woraus hervorgehen würde, dass man im Stande ist, die Aufmerksamkeit auf das rechte oder linke Netzhautbild besonders zu richten.

Die Vereinigung der beiden Netzhautbilder zu einem körperlichen Bilde bleibt trotz der angeführten Betrachtungen, die einiges zur Aufklärung des Vorganges beitragen, doch eine der wunderbarsten Erscheinungen in der Sinnenwelt. Wir müssen uns vorläufig damit begnügen, die physikalischen und physiologischen Bedingungen derselben festzustellen. Die Vorstellung der Körperwelt ist immerhin ein Seelenact, welcher im Gehirn vor sich geht, und sich als solcher allen wissenschaftlichen Vermuthungen noch lange entziehen wird.

---

## Neuntes Kapitel.

Optische Täuschungen. — Scheinbare Grösse des Mondes. — Intuition. — Täuschungen des Farbensinnes. — Seele und Sinnesempfindung.

So vollkommen auch der von der Natur uns verliehene optische Apparat ist, so kommen doch Fälle vor, in welchen wir die Dinge anders sehen als sie in Wirklichkeit sind. Wir nennen solche Erscheinungen optische Täuschungen, und diese sind um so interessanter als sie uns in den Act der Wahrnehmung manchen Einblick gewähren.

Ob zwei Linien miteinander parallel sind, schätzen wir mit einer ziemlichen Genauigkeit ab. Von Zöllner ist aber beobachtet worden, dass wir darin einer sonderbaren Täuschung unterliegen, wenn die parallelen Linien von kleinern schrägen Linien durchkreuzt werden, die sich einander zuneigen, wie in Fig. 46. Die Linien *2* und *3* scheinen für den unbefangenen Blick nach unten auseinander zu weichen, die Linien *1* und *2* nach oben, und doch sind sie ganz parallel, wenn wir eine genaue Messung vornehmen. Die schrägen Striche der Linien *1* und *2* schneiden sich verlängert unten, und die Folge davon ist, dass die Linien selbst sich scheinbar oben schneiden werden. Die scheinbare Convergenz der Linien liegt also der der schrägen Striche immer entgegengesetzt.

1 2 3

*Fig. 46.*

Man kann zur Erklärung dieser Erscheinung anführen, dass durch die schrägen Striche eine Beirrung des Urtheils eintritt, wodurch der Schluss entsteht, dass weil jene sich oben schneiden, die Linien sich unten schneiden müssten. Im übrigen ist die Täuschung eine noch stärkere, wenn wir die Linien in eine horizontale Lage bringen.

Beirrungen des Urtheils führen auch in einigen Fällen zur Scheinbewegung der Objecte. Am bekanntesten ist der Schwindel, welcher nach schnellem Drehen des Körpers eintritt. Nachdem man wieder feststeht, scheinen sich die Objecte eine kurze Zeit nach der

entgegengesetzten Seite zu bewegen. Etwas Aehnliches beobachtet man, wenn man eine Reihe von Gegenständen gegen einen festen Hintergrund schnell vorbeiziehen sieht. Betrachtet man z. B. einen Wasserfall, durch welchen man auf die dahinterliegenden Felsen schaut, eine Zeit lang, so hat man plötzlich die Empfindung als ob die Felsen in die Höhe stiegen.

In allen solchen Fällen übertragen wir von der Geschwindigkeit des sich bewegenden Gegenstandes etwas auf den ruhenden, und zwar in der entgegengesetzten Richtung. Noch frappanter ist diese Erscheinung, wenn wir in einem stillstehenden Eisenbahnzuge sitzen und einen vorübergehenden Zug betrachten. Sehr häufig haben wir dann die Empfindung, als ob wir selbst fahren und der Zug aussen stillstände, und erst wenn wir durch das andere Fenster die ruhenden Gegenstände erblicken, verlieren wir diese Täuschung. In diesem Falle übertragen wir die ganze Geschwindigkeit des betrachteten Zuges auf uns selbst, und erhalten dadurch die Empfindung der Bewegung.

Es scheint, dass in einigen von diesen Täuschungen die Augenbewegungen eine gewisse Rolle spielen. Wenn wir die von Zöllner angegebene Figur anblicken, so können unsere Augen durch die Betrachtung der schrägen Linien sehr leicht aus der gewöhnlichen Lage durch Rotation um ihre Axe in eine schräge Lage gerathen, sodass der senkrechte Durchmesser sich etwas schräg stellt, und das kann dazu beitragen, dass sich unser Urtheil über die Lage der senkrechten Linien verschiebt. Zur Stütze dieser Ansicht führt Helmholtz an, dass bei momentaner elektrischer Beleuchtung die Täuschung ausbleibt oder mindestens viel schwächer wird, weil im Momente des Sehens keine Augenbewegungen gemacht werden können.

Auch beim Drehschwindel können die Augenbewegungen eine Rolle spielen. Denn während wir uns drehen, sucht das Auge jeden gesehenen Gegenstand eine Zeit lang festzuhalten, und wird nun beim Wei-

terdrehen ruckweise auf den nächstfolgenden Gegenstand übergehen. Dadurch entstehen ruckförmige Bewegungen der Augen, welche nach dem plötzlichen Aufhören des Drehens noch einige Secunden lang anhalten, und diese sind es wahrscheinlich, welche die Scheinbewegung erzeugen. Wenigstens rufen alle Bewegungen des Augapfels, welche nicht mit Bewusstsein und Wille durch unsere Augenmuskeln erzeugt werden, eine Scheinbewegung der Objecte hervor. Das ist bei krankhaften zuckenden Bewegungen des Auges der Fall, wodurch Schwindelgefühl entsteht. Ferner beobachten wir eine solche Bewegung der Objecte, wenn wir den Augapfel mit dem Finger passiv verschieben und ihn dadurch hin- und herrollen. Die Objecte drehen sich dann in entgegengesetzter Richtung als der Augapfel, weil wir kein Bewusstsein davon haben, dass der Augapfel sich in eine andere Lage bewegt.

Etwas Aehnliches scheint auch beim längern Betrachten sich bewegender Gegenstände einzutreten. Beim Anblick eines Wasserfalles sucht das Auge gleichfalls die Massen eine Strecke zu begleiten, und indem es wieder zurückgeht, geräth es in ruckförmige Bewegungen. Halten diese eine Zeit lang an, so scheinen uns feste Gegenstände nach oben zu steigen, weil wir von den ruckförmigen Bewegungen des Auges, die nach unten hin stattfinden, keine bewusste Empfindung haben.

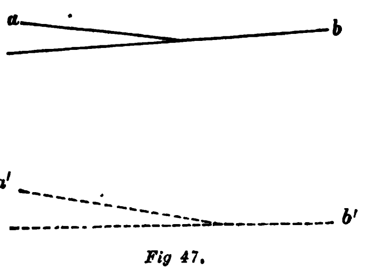


Fig 47.

Die Verschiebung unsers Urtheils über die horizontale, die auf- und absteigende Richtung kommt bei manchen Gelegenheiten zum Vorschein. Wenn wir uns z. B. auf einer mässig abfallenden Chaussee *b* bewegen (Fig. 47) und erblicken

in einiger Entfernung eine ebenfalls absteigende Strasse *a*, die mit *b* zusammentrifft, so schätzen wir die Steigung von *a* meistens viel zu gross und wundern uns, dass wir diese Strasse viel weniger steil vorfinden, als wir geglaubt haben. Diese Täuschung scheint daher zu rühren, dass wir die Strasse *b*, auf der wir uns bewegen, als die feste Linie betrachten, von der aus wir die Steigung von *a* abschätzen. Wir identificiren daher *b* in unserer Vorstellung mehr oder weniger mit einer horizontalen Ebene, die uns für gewöhnlich als Normallage gilt, und dadurch erhält die Strasse *b* in der Vorstellung eine stärkere Steigung, wie sich aus der punktirten Figur ($a'$ $b'$) ergibt.

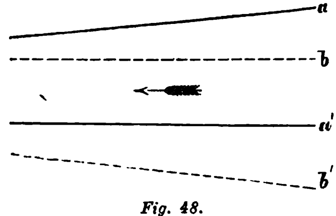



*Fig. 48.*

Eine andere auffallende Täuschung, welcher wir zuweilen im Gebirge begegnen, besteht darin, dass es uns scheint, als ob ein Bächlein, dem Gesetze der Schwere entgegen, bergauf flösse. Wenn wir uns auf einer sanft abfallenden Strasse *a* abwärts bewegen (Fig. 48) und es fliesst daneben ein Bach *b*, welcher einen geringern Fall besitzt als die Strasse, oder nahezu horizontal liegt, so kommt es uns häufig so vor, als ob der Bach in der Richtung des Pfeiles bergauf stiege. Auch in diesem Falle halten wir die Strasse für die Horizontale, weil wir uns daran gewöhnt haben, sie als die feste Ebene zu betrachten, von der aus wir alle übrigen Lagen abschätzen, und dadurch erhält, wie $a_1$ $b_1$ zeigt, der Bach in unserer Vorstellung eine aufsteigende Richtung. Noch stärker pflegt diese Täuschung hervorzutreten, wenn über den absteigenden Weg

eine Wasserleitung in einer Rinne geleitet ist, in welcher das Wasser bergauf zu fliessen scheint.

Auch unser Urtheil über die Grösse der Gegenstände erleidet unter manchen Umständen manche Abirrungen. Ein sehr bekannter Scherz ist es, von einer Person an der Wand angeben zu lassen, bis wohin ein auf den Boden gesetzter Cylinderhut reicht. Setzt man dann den Hut hin, so ist derselbe meist um ein bedeutendes Stück kleiner, als man geglaubt. Die Ursache dieser Täuschung ist die, dass wir die Wand am Erdboden in der Verkürzung erblicken, weil wir sie von oben herab betrachten, den Hut aber in seiner wirklichen Grösse im Gedächtniss haben, und daher ein zu grosses Stück der Wand dem Hute gleichsetzen.

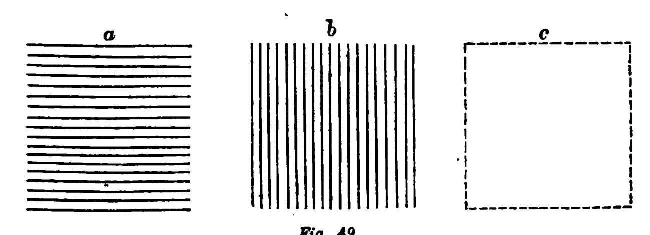



*Fig. 49.*

Ausserdem aber fehlt es uns an einer unbegrenzten gleichmässigen Wandfläche an einem Massstabe zur Beurtheilung der Entfernung, und in solchen Fällen machen wir immer die Bemerkung, dass wir vorgestellte Entfernungen zu gross wählen. An einer tapezierten Wand, an der wir durch Linien einen Anhalt für unser Urtheil haben, ist daher die Täuschung eine viel geringere.

Wir können solchen Beobachtungen auf folgende Weise eine genauere Form verleihen. Wenn wir zwei gleich grosse Quadrate aus parallelen Linien zusammensetzen (Fig. 49), das eine aus senkrechten, das andere aus horizontalen Linien, so erscheint das letztere dem unbefangenen Blicke höher als breit, wie Fig. *a* zeigt,

das erstere, Fig. *b*, dagegen breiter als hoch, beide scheinen aber einen grössern Raum einzunehmen als ein gleich grosses leeres Quadrat *c*. Unser Urtheil findet hier für die Schätzung der Grösse einen Anhalt an den Zwischenräumen zwischen den Linien, und indem wir diese addiren, erhalten wir eine Summe von Grössen, welche wir nicht erhalten, wenn wir den Blick in der Längsrichtung der Linien entlang führen. Die Summe der Theile erscheint uns aber grösser als das Ganze, weil wir uns dabei der Grösse jedes Theiles bewusst werden, während das ungetheilte Ganze keinen so lebhaften Eindruck von seinem Inhalte in unserer Vorstellung hinterlässt. Es scheint uns daher, als ob das leere Quadrat die beiden andern nicht fassen könnte, obgleich sie genau gleich gross sind.

Unser Augenmass wird auf mannichfache Weise getäuscht, wenn wir es unter Verhältnissen anwenden, unter welchen wir keine Erfahrungen über dasselbe besitzen. Wenn wir z. B. in geringer Entfernung einen kleinen Hügel vor uns haben, dessen Kamm sich vom Himmel scharf abhebt, und wir erblicken auf demselben Personen, welche sich gegen den Horizont projiciren, so erscheinen uns diese oft riesengross, während sie, in der Nähe gesehen, eine ganz gewöhnliche Grösse haben. Unser Urtheil wird in diesem Falle dadurch abgelenkt, dass die Personen sich gegen den Horizont projiciren, und da nach der gewöhnlichen Erfahrung alle am Horizonte liegende Gegenstände eine verhältnissmässig grosse Entfernung besitzen, so sind wir gewöhnt, diese Entfernung bei der Abschätzung der Grösse in Betracht zu ziehen, und einem am Horizont befindlichen Gegenstande werden wir immer eine beträchtliche Grösse zuertheilen. Diese Erfahrung verleitet uns nun, unter abweichenden Verhältnissen falsch zu urtheilen, indem wir die Entfernung jener Personen grösser annehmen als sie ist.

Eine bekannte Frage ist: Wie gross erscheint uns der Mond am Himmel? Der eine antwortet wie ein

Teller, der andere wie ein Thaler, ein anderer gar wie ein Groschen.

Es ist klar, dass die Frage sowol wie die Antwort keinen streng wissenschaftlichen Sinn hat. Denn derjenige, welcher weiss, dass der Mond eine sehr grosse Kugel von 468 Meilen Durchmesser ist und in einer Entfernung von 50,000 Meilen im Weltenraume schwebt, wird solche Vergleiche mit Gegenständen auf der Erde niemals anstellen, sondern immer die Vorstellung von einer sehr grossen, weit entfernten Kugel haben. Aber der unbefangene Blick setzt die Entfernung der Gestirne alle in eine Fläche, welche man sich als Himmelsgewölbe über die Erde ausgespannt vorstellt. Dem Himmelsgewölbe ertheilen wir die Gestalt einer etwas niedrigen Glocke, die über den Horizont gestülpt ist, sodass uns ihre Entfernung im Zenith kleiner vorkommt als am Horizont, aber eine bestimmte Vorstellung über diese Entfernung machen wir uns nicht. Es scheint, dass hierin die augenblickliche Disposition und die individuelle Auffassung die Hauptrolle spielt, und davon hängt es ab, mit welcher Grösse wir die scheinbare Grösse des Mondes vergleichen. Schneiden wir in ein Papier ein kreisförmiges Loch von der Grösse eines Groschens, so wird der Mond durch dieses Loch eben vollständig gesehen werden, wenn wir es in der Entfernung von einigen Schritten vor den Augen anbringen. Ein tellergrosses Loch aber müssen wir mindestens in einer Entfernung von einigen hundert Schritten anbringen, wenn der durchscheinende Mond es gerade ausfüllen soll. Es liegt also eine grosse Willkür darin, mit welchem Gegenstande wir den Mond seiner scheinbaren Grösse nach vergleichen.

Ein anderer Umstand aber verdient eine wissenschaftliche Beachtung und ist nicht der Willkür unterworfen. Wir bemerken nämlich, dass der tief am Horizont stehende auf- oder untergehende Mond uns entschieden grösser vorkommt als der hoch am Himmel stehende. Es handelt sich hierbei nicht etwa um eine

Brechung von Lichtstrahlen in verschiedenartigen Luftschichten; denn es findet zwar am Horizont durch Brechung eine scheinbare Hebung der Gestirne statt, sodass Mond und Sonne in der senkrechten Richtung etwas abgeplattet erscheinen, aber eine wirkliche Vergrösserung des scheinbaren Durchmessers kann dadurch nicht erzeugt werden.

Für die Ursache dieser Täuschung können zwei Gründe angeführt werden. Erstens der, dass uns der Himmel wie eine elipsoide Glocke erscheint. Ihren Rand am Horizonte halten wir daher für entfernter als ihren höchsten Punkt im Zenith, und wenn wir nun den Mond in die Fläche des Himmelsgewölbes verlegen, so halten wir ihn am Horizonte für entfernter als im Zenith. Nun wissen wir aber aus Erfahrung, dass ein Gegenstand um so kleiner erscheint, je entfernter er ist; je grösser uns aber ein entfernter Gegenstand erscheint, um so bedeutender werden wir seine wirkliche Grösse halten. Da nun der Mond am Horizonte uns entfernter erscheint als im Zenith, und die scheinbare Grösse trotzdem dieselbe bleibt, so halten wir am Horizonte seine wirkliche Grösse für bedeutender als im Zenith.

Eine zweite Ursache für diese optische Täuschung liegt aber noch darin, dass wir den Mond am Horizonte mit Gegenständen auf der Erde vergleichen. Steht er z. B. neben einem Hause, das wir am Horizonte erblicken, so nimmt er einen viel grössern Raum als dieses ein, und unwillkürlich stellen wir uns vor, wieviel mal grösser eine solche Kugel sein würde, wenn sie wirklich neben dem Hause stände, und gelangen dadurch zu einer für uns fassbaren, für irdische Gegenstände sehr bedeutenden Grösse. Einen derartigen Vergleich können wir mit dem Monde nicht anstellen, wenn er hoch am Himmel steht, und da der Raum, den er am Himmel einnimmt, uns gegen die grosse Himmelsfläche sehr winzig erscheint, so sind wir geneigt, ihn mit kleinern Gegenständen zu vergleichen.

Manche optische Täuschung lässt sich darauf zurückführen, dass wir keine genügenden Anhaltspunkte zur Beurtheilung des Gesehenen haben. Es tritt dann die Phantasie ergänzend ein und verursacht häufig eigenthümliche Täuschungen. Wenn wir z. B. auf einer Thurmspitze (Fig. 50) eine Wetterfahne in der Stellung erblicken, wie sie in nebenstehender Zeichnung abgebildet ist, so haben wir häufig keine Merkzeichen dafür, ob die Fahne uns zugewendet oder von uns abgewendet ist. Wir können sie uns in der Zeichnung willkürlich einmal nach der einen oder nach der andern Seite gedreht denken. Durch gewisse Nebenumstände, wie Beleuchtung oder Bewegungen der Fahne, werden wir häufig im Stande sein, die richtige Stellung zu finden, aber wenn solche Merkzeichen fehlen, so bleiben wir oft im Zweifel, oder wir halten willkürlich die eine oder andere Stellung für die wirkliche. Diese Erscheinung tritt natürlich nur dann ein, wenn wir uns in einer solchen Entfernung von der Wetterfahne befinden, dass wir nicht im Stande sind, die verschiedene Entfernung des Schaftes und des freien Randes von uns abzumessen, die sich in beiden Stellungen entgegengesetzt verhalten.

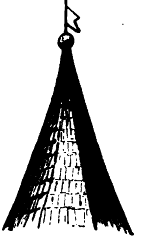
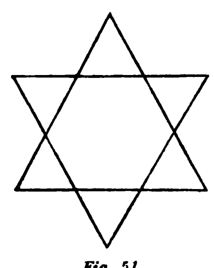


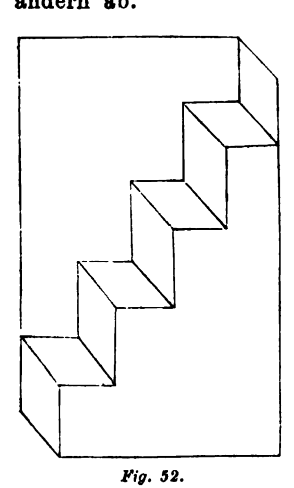
*Fig. 50.*

In allen solchen Fällen, wo die Auffassung des Gesehenen mehrere Deutungen zulässt, greift unser Vorstellungsvermögen eine dieser Deutungen heraus und vernachlässigt die andern, aber wir sind im Stande, die verschiedenen Deutungen hintereinander abwechseln zu lassen. Man hat diese Eigenschaft unseres Vorstellungsvermögens mit dem Namen Intuition bezeichnet. Folgendes Beispiel kann dazu dienen, diese Eigenthümlichkeit zu erläutern. Die umstehende Fig. 51 kann in zweierlei Weise aufgefasst werden, erstens als zwei gleichseitige Dreiecke, welche sich mit ihren Seiten kreuzen. Dies möchte die gewöhnliche

Auffassung sein. Wir können die Figur aber auch betrachten als ein Sechseck, dessen Seiten mit kleinen Dreiecken besetzt sind. In beiden Fällen macht uns die Figur einen andern Eindruck, indem wir sie auf verschiedene Weise entstanden denken.


*Fig. 51.*

Aehnlich verhält es sich mit der Zeichnung in Fig. 52. Wir können uns vorstellen, dass sie die Contour einer Treppe bedeute, die an einer Wand aufsteigt; wir können uns aber auch darunter ein abgerissenes, überhängendes Mauerstück vorstellen, welches nach unten hin eine treppenförmige Contour besitzt. Je nach Willkür wechselt die eine Vorstellung mit der andern ab.


*Fig. 52.*

Auch im Gebiete der Farbenempfindung kommen Täuschungen vor, welche durch eine Verschiebung unseres Urtheils entstehen. Man nehme ein grünes Papier und klebe darauf ein kleines Quadrat von weissem Papier auf. Nun bedecke man das Ganze mit einem Stück dünnen, durchscheinenden weissen Seidenpapier, sodass das darunterliegende Papier durchschimmert. Es erscheint dann das kleine Quadrat sehr deutlich roth gefärbt, während die übrige Fläche weisslich aussieht. Zeigt man dies einem Unbefangenen, der nicht weiss, was unter dem bedeckenden Papiere liegt, so hält er das Quadrat unbedingt für Roth, während er auf der grossen Fläche den grün-

lichen Ton kaum herauserkennt. Unter denselben Umständen erscheint ein weisses Quadrat auf rothem Grunde grün, ein weisses auf blauem gelb und umgekehrt.

Man könnte meinen, dass man es hier mit einer gewöhnlichen Contrasterscheinung zu thun habe, welche entsteht, wenn wir längere Zeit auf eine farbige Fläche gesehen haben und dann zu einer weissen Fläche übergehen. Denn allerdings erscheint eine weisse Fläche röthlich, wenn wir durch den Anblick von grünem Lichte die Netzhaut ermüdet haben, oder umgekehrt. Aber in unserm Falle haben wir es nicht mit einer Ermüdungserscheinung zu thun, weil die Färbung der grossen Fläche so wenig hervortritt, dass sie kaum erkannt wird, also auch das Auge für seine Färbung nicht ermüden kann. Nehmen wir das bedeckende Papier fort, so erkennen wir sogar das weisse Quadrat sofort als weiss an, obwol die Ermüdung durch die farbige Fläche nun eine viel stärkere wird.

Derartige Erscheinungen, wie die eben beschriebene, sind von Helmholtz Simultancontraste genannt worden. Sie erklären sich daraus, dass dabei eine Verschiebung unseres Urtheils über das, was wir für Weiss halten, eintritt. Für weiss halten wir einen Körper, wenn er alle Farben in dem Verhältniss reflectirt, in welchem sie im Sonnenlichte enthalten sind. Aber wir gewöhnen uns an kleine Veränderungen dieses Verhältnisses, und halten diese kleinen Abweichungen auch für Weiss. Dies geschieht nun in der That in dem angeführten Versuche, in welchem wir die farbige, von weissem Papiere bedeckte Fläche für Weiss halten. Die Folge davon ist nun, dass wir das wirkliche Weiss des kleinern Quadrats nicht als ein solches anerkennen, sondern für ein Weiss, welches zur Contrastfarbe hinneigt.

Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Lichtqualität,

welche wir Weiss nennen, nicht dieselbe bleiben würde, wenn sich das Verhältniss der Farben im Sonnenlichte ändern würde, und da, wie wir vermuthen, auch die Sonne und ihr Licht nicht für ewige Zeiten unveränderlich ist, so wäre es möglich, dass unsere späten Nachkommen eine ganz andere Empfindung für Weiss besitzen werden als wir.

An den Täuschungen des Gesichtssinnes und auch der übrigen Sinnesorgane erkennen wir am besten, welche grosse Rolle die Thätigkeit der Seele bei den Sinneswahrnehmungen spielt, denn die Seelenthätigkeit allein ist im Stande, die Sinneswahrnehmung zu verändern, und dadurch in gewissen Fällen Täuschungen hervorzurufen. Man erkennt daraus ferner, dass jede Sinnesempfindung erst durch die Seelenthätigkeit zu einer Sinneswahrnehmung wird. Denn die Sinnesempfindung, d. h. die Erregung des Sinnesorgans und die Leitung dieser Erregung zum Gehirn, schliesst es noch nicht in sich, dass diese Empfindung auch schon mit einer Wahrnehmung eines Objectes oder Vorganges in der Aussenwelt verbunden ist. Man hat an Thieren, namentlich an Tauben, denen man die beiden Halbkugeln des grossen Gehirns herausgenommen hat, und die noch lange Zeit am Leben erhalten werden können, die Beobachtung gemacht, dass sie eine Lichtempfindung besitzen, weil Licht, welches in das Auge einfällt, noch eine Zusammenziehung der Pupille hervorbringt, ein Vorgang, der nur durch das Centrum des Sehnerven im Gehirn vermittelt werden kann. Aber das Verständniss des Gesehenen, d. h. eine wirkliche Sinneswahrnehmung, ist bei diesen Thieren nicht mehr vorhanden. Sie verhalten sich wie blinde Thiere, laufen gegen jedes Hinderniss an, haben also nicht mehr die Fähigkeit, das Gesehene als ein Object der Aussenwelt zu erkennen.

Wir müssen annehmen, dass sich beim Menschen die Vorgänge ähnlich verhalten: dass die Wahrnehmung der

Aussenwelt in letzter Instanz erst eine Function der Seelenthätigkeit ist, welche im grossen Gehirn ihren Sitz hat und an dieses Organ gebunden ist, und dass das Sinnesorgan mit seinen Nervenverbindungen der Seele gleichsam nur das Material liefert, welches sie zu einer Sinneswahrnehmung verarbeitet.

---

# DRITTER ABSCHNITT.

## Der Gehörssinn.

---

### Erstes Kapitel.

Bau des Gehörorgans im allgemeinen. — Der Schall als Ton, Klang oder Geräusch. — Die tonerzeugenden Instrumente.

Das Gehörorgan liegt dem Blicke nicht so offen dar wie das Auge. Dieses wendet fast die ganze Hälfte seiner Kugelfläche nach aussen der Lichtwelt zu, jenes dagegen bohrt sich mit seinen wichtigsten Theilen tief in das Innere des Felsenbeins ein und lässt dem Blicke nur einen sehr untergeordneten Theil, die Ohrmuschel, frei, welche deshalb im gewöhnlichen Sprachgebrauche den unverdienten Namen das Ohr erhalten hat. Die barbarische Strafe des Ohrabschneidens in ältern Zeiten und unter uncivilisirten Völkern, liefert mit genügender Schärfe den physiologischen Beweis dafür, dass die Muschel beim Hören entbehrt werden kann. Auch besitzen die meisten Vögel kein äusseres Ohr und haben doch ein recht gutes, zum Theil sogar musikalisches Gehör.

Es verhält sich die Organisation des Ohres zu der des Auges genau so wie die Beschaffenheit unseres

Gesichtskreises zu der unseres Hörbereiches. Die Weite des Gesichtskreises hat überall da eine Grenze, wo ein undurchsichtiger Körper sich in demselben einstellt, reicht aber im durchsichtigen Medium bis in die Unendlichkeit des Sternenhimmels, und dem entsprechend dringt der Lichtstrahl durch das Innere des Auges in nahezu gerader Linie bis auf den Grund desselben ein. Der Bereich unserer Gehörswahrnehmungen dagegen wird zwar im Luftraume der Erde sehr bald durch die Entfernung beschränkt, aber der Schall vermag die dichtesten Wände zu durchdringen und auf dem krummsten Pfade sich fortzupflanzen, sodass im tiefsten Schachte der Erde, in welchen kein Lichtstrahl fällt, das Ohr uns von dem Vorhandensein einer Aussenwelt sichere Kunde geben kann. So sind die innern Theile unseres Ohres gleichsam in einem verborgenen Schachte eines Kopfknochens eingegraben, der mit vielen wunderbaren labyrinthartigen Gängen ausgestattet ist. Der Schall pflanzt sich bis zu diesen hin nicht in einer geraden Linie fort, sondern läuft auf einem sehr künstlich hergestellten Pfade, welcher aus Röhren, Membranen und den Gehörknöchelchen zusammengesetzt ist.

In Fig. 53 sind die wesentlichen Theile des Gehörorganes nach Helmholtz in natürlicher Grösse dargestellt. Wir sehen den Gehörgang *D*, welcher innen mit dem Trommelfell *cc* endet. Dieses ist eine runde, schräg ausgespannte Membran, auf welche nach innen ein mit Luft gefüllter Hohlraum, die Trommelhöhle *B*, folgt, deren Wände von Knochenmasse gebildet werden. In ihr liegen die Gehörknöchelchen, deren es drei gibt, der Hammer, der Ambos und der Steigbügel. Die Höhle hat eine Oeffnung nach innen hin, welche in einen Kanal, die Ohrtrompete *E*, führt, der sich trompetenartig erweitert und in der Rachenhöhle ausmündet. An der innern Wand der Trommelhöhle befinden sich zwei mit Membranen verschlossene Oeffnungen, ein ovales Fenster *o*, an welches die Fuss-

platte des Steigbügels anstösst und ein rundes Fenster *r*, welches frei überspannt ist.

Durch diese beiden Fenster gelangen wir nach innen zu in das Labyrinth *A*, eine sonderbar gewundene knöcherne Höhle, deren Wände von Häuten und merkwürdigen Organen ausgekleidet und deren Inneres von dem Labyrinthwasser ausgefüllt ist. Wir unterscheiden an ihm nach der einen Seite hin die Schnecke und nach der andern die halbcirkelförmigen Kanäle.

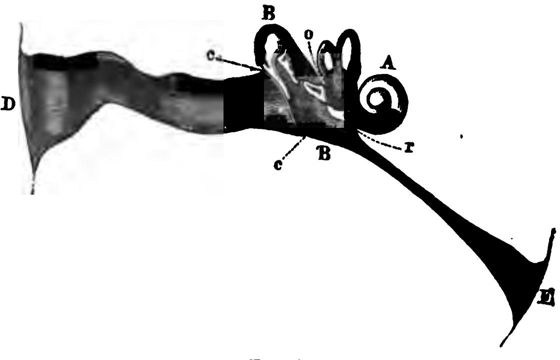



*Fig. 53.*

Indem wir somit einen ersten flüchtigen Blick auf die wesentlichen Theile des Ohres geworfen haben, erkennen wir bereits, dass der Gehörgang, das Trommelfell, die Trommelhöhle mit den Gehörknöchelchen nur dazu dienen können, um den Schall von aussen aufzufangen und ihn nach innen hin fortzuleiten, dass dieser dann der Labyrinthflüssigkeit mitgetheilt werden muss, und dass im Labyrinth endlich der eigentliche physiologische Hörprocess beginnen kann, weil hier die schallleitenden Apparate, gleichsam in sich zurücklaufend, ihr Ende erreichen. In der That dringt hier durch die Knochenmasse der Hörnerv ein und überträgt, vermöge einer Verbindung mit höchst wunderbar gebauten

Endorganen, den todten Schall in lebendige Empfindung.

Obgleich der Schall als solcher nur durch die Erregungen unseres Gehörorganes aufgefasst werden kann, so ist doch seine Entstehung in der Natur und der wesentliche Vorgang dabei von den Physikern schon lange gründlich erkannt worden, bevor man etwas von den Vorgängen im innern Ohre gewusst hat. Es verhält sich in dieser Beziehung die physikalische Akustik bis zu einer gewissen Grenze ebenso unabhängig von der physiologischen Kenntniss, wie dies in der Optik der Fall gewesen ist, in welcher man zur Undulationstheorie gelangte, ohne von der Beschaffenheit der Netzhaut und der Nervenerregung in ihr etwas Klares zu wissen. Ja, man muss sogar constatiren, dass das ausschliessliche objective physikalische Studium von Schall und Licht absolut vorausgehen musste, um überhaupt zu physiologischen Betrachtungen über die Function der Sinnesorgane zu gelangen; und es hat sich dann meistens gezeigt, dass viele Apparate und Vorrichtungen, welche im Laufe der Jahrhunderte vom denkenden Menschengeiste mühsam erfunden worden sind, schon in den Sinnesorganen in grösster Vollendung von der Natur geschaffen waren. Nichtsdestoweniger ist in den letzten Jahrzehnten die physikalische Forschung an eine Grenze gelangt, an welcher sie sich durch das physiologische Studium der Sinnesempfindung in wesentlichem Grade ergänzt und aus ihm neue Nahrung zu weiterer Untersuchung zu schöpfen vermag.

Unter den Schallempfindungen hebt sich eine Art von Empfindung vor allen übrigen ab, welcher ein ganz bestimmter Charakter zukommt. Es sind dies die musikalischen Empfindungen, welche wir mit dem Namen Ton und Klang bezeichnen. Alle andern Schalleindrücke, welche diesen Charakter nicht besitzen, können wir unter dem Begriffe Geräusche zusammenfassen.

Ein Ton entsteht, sobald irgendein elastischer Körper

in schnelle Schwingungen versetzt wird. Wenn wir z. B. einen Streifen Metallblech oder eine Stricknadel an einem Ende festklemmen, und ihr freies Ende anschlagen, so sehen wir dasselbe in Schwingungen gerathen, welche von einem Schwirren oder einem Tone begleitet werden, der um so höher wird, je kürzer das schwingende Stück ist. Der Ton einer Stimmgabel kommt auf dieselbe Weise zu Stande. In Fig. 54 denke man sich die gezeichnete Stimmgabel in Schwingung. Die Zinken derselben neigen sich bei jeder Schwingung einander zu und wenden sich wieder voneinander ab, ein Vorgang, welcher bei den musikalisch gebräuchlichen Stimmgabeln dem Auge nicht mehr zugänglich ist, weil die Schwingungen zu klein sind und zu schnell erfolgen. Mit Hülfe einer Vorrichtung lassen sich aber die Schwingungen aufschreiben, indem man an eine Zinke einen Stift *b* befestigt, welcher auf einer schnell vorübergezogenen Platte *B B* zeichnet. Hier entsteht eine Wellenlinie, welche uns die Zahl der Schwingungen angibt, wenn wir die Geschwindigkeit der Platte kennen. In Fig. 55 ist ein Apparat abgebildet, der Phonautograph, mit welchem man einen solchen Versuch ausführen kann.

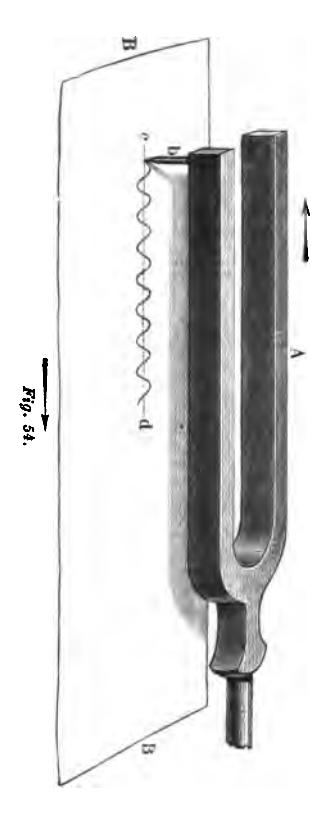


Fig. 54.

**Die** Stimmgabel schreibt mit einer Spitze *r* auf einer mit berusstem Papier überzogenen Trommel, die durch eine Kurbel in schnelle Rotation versetzt wird. Durch ein Schraubengewinde bei *A* rückt sie während der

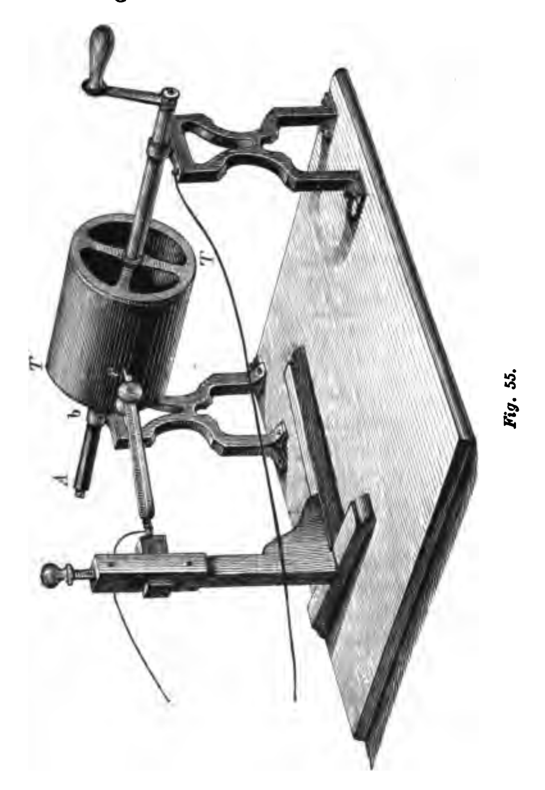



*Fig. 55.*

Drehung beständig vorwärts. Zwei Drähte führen von der Gabel und der Trommel zu einem starken Inductionsapparat, aus welchem mit Hülfe eines Uhrwerkes in jeder Secunde ein elektrischer Funke abgeleitet wird, der in das berusste Papier ein Loch schlägt;

und nun kann man die Zahl der Schwingungen in einer Secunde leicht zählen.

Die deutschen Physiker sind übereingekommen, unter einer Schwingung einen Hin- und Hergang des schwingenden Körpers zu verstehen, sodass durch eine Schwingung eine einmal auf- und absteigende Wellenlinie gezeichnet wird. Der Körper macht aus der Ruhelage eine Excursion oder Elongation nach der einen Seite, schwingt durch die Ruhelage hindurch nach der andern Seite, um dann wieder in die Ruhelage zurückzukehren, von der aus sich der Vorgang in derselben Richtung periodisch wiederholt. Das Ganze nennt man auch der Zeit nach eine Schwingungsperiode, und die Weite der Schwingung die Amplitude.

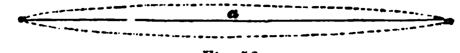



*Fig. 56.*

In allen tonerzeugenden Instrumenten entstehen die Töne durch ebensolchen Vorgang. Eine gespannte Saite, welche in den Klavieren und Streichinstrumenten den Ton erzeugt, schwingt wie Fig. 56 zeigt, indem sie einmal nach der einen und einmal nach der andern Richtung ausschlägt, eine Glasplatte oder eine Glocke tönt, wenn sie angeschlagen wird, ebenfalls infolge der Schwingungen, welche ihre Theilchen senkrecht gegen die Fläche ausführen. Solche Schwingungen, welche senkrecht gegen die Längenausdehnung des Körpers gerichtet sind oder, besser gesagt, senkrecht auf die Richtung der Fortpflanzung, nennt man transversale Schwingungen. Longitudinale Schwingungen können aber auch Töne hervorbringen, z. B. in Metallstäben, welche man an ihrer Endfläche anschlägt, oder in Holzstäben, welche man der Länge nach reibt.

In den erwähnten Beispielen entsteht der Ton durch die Schwingungen eines festen elastischen Körpers. Es kann aber auch ein Ton unmittelbar durch Schwingungen der Luft erzeugt werden, wenn wir z. B. eine

Hohlkugel oder eine Flasche oder einen hohlen Cylinder an der Oeffnung anblasen. Ein Instrument, welches auf diesem Principe beruht, ist die Lippenpfeife, welche in der Orgel oder als Flöte benutzt wird. In Fig. 57 sind zwei solcher Orgelpfeifen abgebildet. Von unten strömt in den Raum *K* die Luft vom Blasebalg ein, und von dem dreikantigen Stück *d* wird sie durch einen schmalen Spalt *c* gegen die Lippe *a b* geleitet, woselbst sie die in dem Cylinder *R R* enthaltene Luftsäule anbläst und in Schwingung versetzt. Die Luft wird hier durch den ersten Stoss comprimirt, dehnt sich wieder aus, prallt gegen den Luftstrom und geräth dadurch in periodische Schwingungen, die aus Verdichtungen und Verdünnungen zusammengesetzt sind.



Fig. 57.

Die Schallschwingungen der Luft bestehen überhaupt aus Verdichtungen und Verdünnungen, die mit grosser Geschwindigkeit abwechseln, und ein Ton entsteht dabei immer, wenn die Schwingungen mit periodischer Regelmässigkeit vor sich gehen. Daher kann man einen Ton erzeugen, wenn man einen continuirlichen Luftstrom sehr schnell und regelmässig unterbricht. Ein von Seebeck erfundenes Instrument, mit welchem dies geschieht, nennt man eine Sirene, deren einfachste Form uns Fig. 58 zeigt. Sie besteht aus einer Scheibe, welche ringförmig mit Löchern

besetzt ist und mit Hülfe einer Kurbel in schnelle Rotation versetzt wird. Durch ein Rohr *B* wird ein Luftstrom gegen die Löcher geblasen. Der entstehende Ton ist um so höher, je mehr Löcher vorhanden sind und je schneller die Scheibe gedreht wird. Ein jeder Luftstoss erzeugt dann eine Schwingung der Luft. Die Sirene liefert uns ein Mittel, die Zahl der Schwingungen für jeden beliebigen Ton zu bestimmen. Wenn auf der Scheibe *A* vier Reihen von Löchern angebracht sind, deren Zahl von innen nach aussen 8, 10, 12 und 16 betragen, so hören wir, wenn wir sie in genannter Reihenfolge anblasen, den bekannten Accord, welchen wir, von der Note *c* ausgehend, mit *c-e-g-c'* bezeichnen können. Der Klang bleibt bei jeder Drehungsgeschwindigkeit, solange sie constant ist, derselbe, und es wechselt mit der Geschwindigkeit nur die absolute Höhe und Tonart. Haben wir eine Scheibe, welche mit noch mehr Löcherreihen, einer ganzen Tonleiter entsprechend, versehen ist, so können wir vollständige Melodien darauf ertönen lassen.

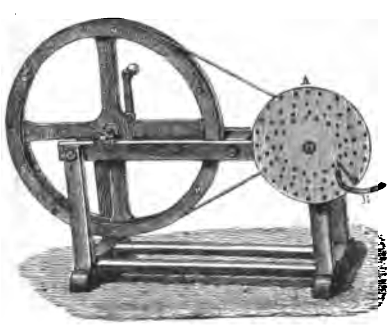


*Fig. 58.*

Die Entstehung des Tones beruht in diesem Instrumente darauf, dass der Luftstrom, der aus dem Rohre tritt, eine plötzliche Verdünnung erfährt, sobald ein Loch vor die Oeffnung tritt, und sobald es vorüber ist, eine schnell folgende Verdichtung. Dieser Process pflanzt sich dann als Schallwelle durch die Luft bis zu unserm Ohre fort.

Eine vollendetere Form der Sirene, von Dove construirt, zeigt uns Fig. 59. Durch das Rohr *B B* wird

ein Luftstrom in den Windkasten $A\,A$ geblasen. Dieser besitzt einen Deckel, dessen Peripherie mit einer Anzahl von Löchern durchbohrt ist. Dicht über diesem

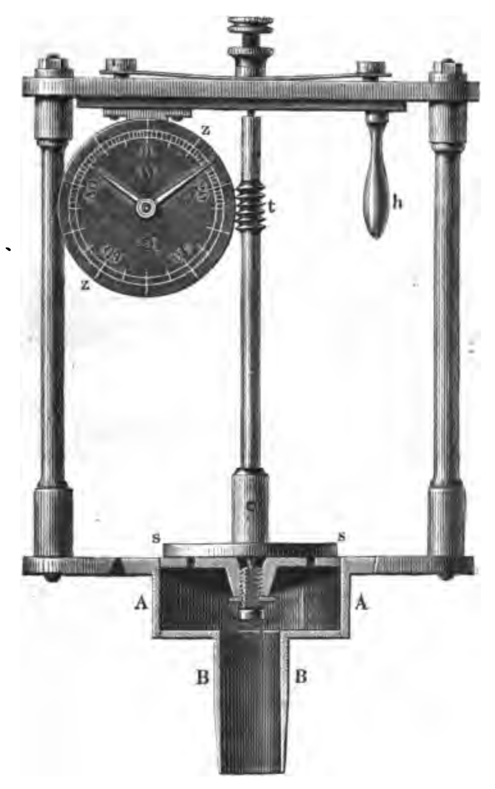



*Fig. 59.*

bewegt sich um eine senkrechte Axe eine Scheibe $S\,S$, durch welche dieselbe Zahl von Löchern in schiefer Richtung hindurchgehen. Auch können die Löcher des Deckels nach der entgegengesetzten Seite schief

gerichtet sein. Der hindurchgehende Luftstrom stösst nun gegen die Wände der Scheibenlöcher und versetzt die Scheibe in Rotation, deren Geschwindigkeit allmählich wächst. Es entsteht durch die Unterbrechungen ein Ton, dessen Höhe allmählich zunimmt und deshalb den unangenehmen Eindruck des Heulens macht. Da man nun die Zahl der Umdrehungen durch ein Zahnrad mit Zifferblatt und Zeigern, *t*, *z z*, ablesen kann, sobald man durch den Griff *h* das Zahnrad mit der Schraube *t* verbindet, so ist man im Stande, die Zahl der Luftstösse, beziehungsweise Schwingungen, für jede beliebige Tonhöhe auszumitteln.

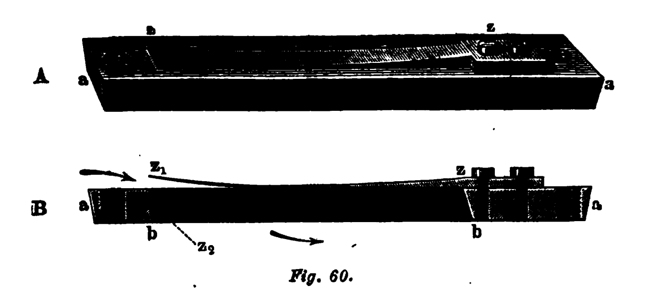



*Fig. 60.*

Noch eine andere Art von Tonerzeugung kommt in der Musik zur Anwendung, nämlich mit Hülfe der Zungenpfeifen, welche bei der Orgel, der Clarinette, dem Oboe und Fagott benutzt werden. Während in den bisher betrachteten Instrumenten der Ton entweder durch einen festen schwingenden Körper, eine Saite, Stimmgabel u. s. w. ohne einen dazu kommenden Luftstrom erzeugt wurde, oder durch die Unterbrechung eines Luftstromes, ohne dass ein fester elastischer Körper Schwingungen dabei ausführte wie in der Sirene, so combinirt sich in einer Zungenpfeife beides miteinander und erzeugt dadurch einen eigenthümlichen Klang. Der schwingende feste Körper besteht hier aus der sogenannten Zunge, Fig. 60. Ein elastischer Metallstreifen *z z*,

ist an einem Ende befestigt und kann in dem Spalte *b b* eines Rahmens *a a* frei schwingen. Die Zunge bildet die Wand eines geschlossenen länglichen Kästchens, oben mit einer Oeffnung versehen, welches in den Windkasten (Fig. 61) eingesetzt wird. Der durch das untere Rohr desselben eingeblasene Luftstrom kann hieraus nur durch den Spalt zwischen Zunge und Rahmen entweichen. Er drängt beim ersten Stoss die Zunge in das Kästchen und entweicht durch die obere Oeffnung, an welche man noch Ansatzröhren von Trichterform anzubringen pflegt. Die Zunge aber schwingt vermöge ihrer Elasticität wieder zurück, verdeckt den Spalt und unterbricht den Luftstrom durch Hin- und Herschwingen periodisch, sodass ein Ton entsteht, dessen Höhe durch die Schwingungszahl der Zunge bestimmt wird. Bei einigen Instrumenten kann man mit einem verschiebbaren Drahte den Ton verändern, indem man ihn verschiebt und die Länge der schwingenden Zunge vergrössert oder verkleinert.

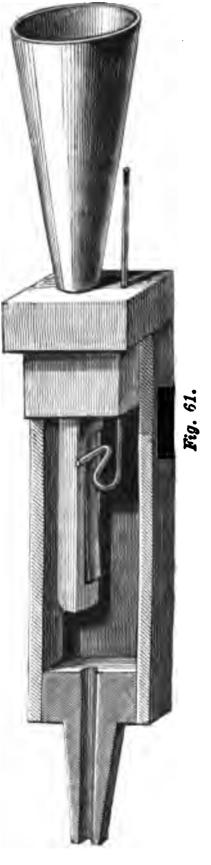


*Fig. 61.*

Die Trompeten und Hörner sind Blasinstrumente, für welche die menschlichen Lippen die Rolle von Zungen spielen. Die gespannten Lippen werden in Schwingung versetzt, während das Rohr des Instrumentes als Ansatzrohr dient und eine sehr starke Resonanz erzeugt. Es ist daher eine besondere Kunst, diese Instrumente anzublasen, weil sie auf einen noch so starken Luftstrom, wenn man sie in den geöffneten Mund einsetzt, gar keinen Ton geben.

Eine Zungenpfeife ist ferner seinem Baue nach der menschliche Kehlkopf. Die Zungen werden durch die beiden Stimmbänder gebildet, zwei elastischen Membranen, welche je mit einem freien Rande einen schmalen Spalt zwischen sich einschliessen, wie dies in Fig. 62 mit Hülfe von Kautschukhäuten künstlich nachgeahmt ist. Wenn wir in das Rohr, welches



*Fig. 62.*

die Luftröhre darstellen soll, hineinblasen, so entsteht ein Ton, der der menschlichen Stimme nicht unähnlich ist, indem die Membranen auseinander weichen, den Spalt öffnen, dann wieder durch ihre Elasticität zusammenschlagen und so einen periodisch unterbrochenen Luftstrom erzeugen. Man nennt eine solche Vorrichtung einen künstlichen Kehlkopf.

---

## Zweites Kapitel.

Vom Hören durch die Luft und durch die Kopfknochen. — Die Ohrmuschel und der Gehörgang. — Erkennung der Schallrichtung. — Schutzvorrichtungen des Ohres.

Die eigentliche Gehörsempfindung beginnt erst da, wo der Hörnerv sich im Labyrinthe ausbreitet, während bis dorthin der Vorgang nur in einer Fortleitung der Schallschwingungen besteht. Es kommt deshalb

beim Hören vor allem darauf an, dass der Schall dem Labyrinthe zugeleitet werde, und zwar der darin vorhandenen Labyrinthflüssigkeit, deren Wellen auf die sich ausbreitenden Nervenapparate einen Reiz auszuüben vermögen. Für gewöhnlich geschieht die Zuleitung des Schalles aus der umgebenden Luft durch den Gehörgang, das Trommelfell und die Gehörknöchelchen zum Labyrinth. Denn jeder in der Luft schwingende Körper versetzt die Luft wiederum in gleichartige Schwingungen, die sich von dem Orte der Entstehung kugelförmig ausbreiten, indem ihre Stärke mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt. Sie bestehen aus Verdichtungen und Verdünnungen der Luft, die sich wie die

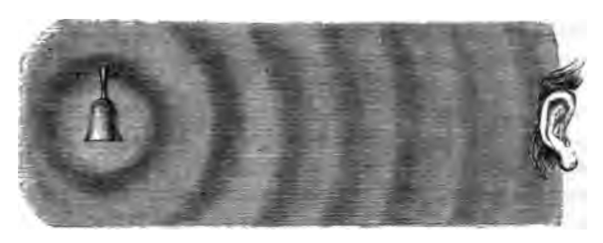


*Fig. 63.*

Wellenringe an der Wasseroberfläche einander folgen, wie es in Fig. 63 dargestellt ist. Aber der Schall kann sich auch ohne Vermittelung der Luft durch feste Körper fortpflanzen und so zum Labyrinthe gelangen. Wenn wir eine Stimmgabel schwach anschlagen und vor den geöffneten Mund halten, so hören wir sie nicht. Sobald wir sie aber mit den Zähnen berühren, hören wir ihren Ton sehr deutlich, der nun durch die Kopfknochen direct zum Labyrinth geleitet wird, ohne Trommelfell und Gehörknöchelchen zu passiren. Auch eine Uhr hören wir ticken, wenn wir sie mit den Zähnen fassen oder an die Schädelknochen dicht hinter dem Ohre andrücken. Bekannt ist ferner ein Kinderspiel, bei welchem die Knochenleitung zum Ohre die Hauptrolle spielt.

Nachdem man einen Metalllöffel an einem Faden aufgehängt, den man um den Zeigefinger umgeschlungen, und den Finger fest in den Gehörgang eingedrückt hat, lässt man den Löffel gegen die Tischkante schlagen, und glaubt nun den stärksten Glockenton zu hören, weil die Schwingungen durch den Faden, den Finger und die Kopfknochen dem Labyrinth mächtig zugeleitet werden.

Während die Knochenleitung im gewöhnlichen Leben des Menschen nicht zur Geltung kommt, weil wir unsere Kopfknochen mit den tönenden Körpern nicht in feste Berührung bringen, spielt sie bei den Fischen eine sehr wichtige Rolle, da diese Thiere weder ein äusseres Ohr, noch einen Gehörgang, noch Gehörknöchelchen besitzen, sondern nur ein Labyrinth, welches entweder ganz von Knochenwänden eingeschlossen oder an einer oberflächlichen Stelle nur durch Haut bedeckt ist. Die Schallwellen des Wassers übertragen sich daher durch die Knochen direct auf das Labyrinthwasser, und dies ist deshalb möglich, weil die Schallwellen des Wassers, welches bekanntlich nicht zusammendrückbar ist, sich ähnlich wie die fester Körper verhalten, und nicht wie die der Luft aus Verdichtungen und Verdünnungen bestehen. Die Schallwellen der Luft übertragen sich dagegen auf feste Körper und Flüssigkeiten sehr schwer, und es bedarf künstlicher Vorrichtungen, um dies zu erreichen, welche wir in höchster Vollendung in unserm Ohre besitzen. Solcher Vorrichtungen bedürfen die Fische nicht, denen es nur darauf ankommt, die Vorgänge im Wasser zu hören; im Gegentheil würde ein mit Luft erfüllter Apparat, zwischen dem Wasser und ihrem Labyrinth angebracht, eine beträchtliche Schwerhörigkeit bei ihnen erzeugen.

In Krankheitsfällen kann die Knochenleitung auch beim Menschen eine grössere Bedeutung erlangen. Wenn die schallleitenden Apparate erkrankt sind und ihre Schuldigkeit nicht mehr thun, so kann trotz der Taubheit

noch eine Knochenleitung vorhanden sein, welche dann für den Arzt das sehr wichtige diagnostische Merkmal abgibt, dass das Labyrinth und der Gehörnerv gesund sind.

Die Luftleitung zum Ohr ist somit der reguläre Vorgang, mit dem wir uns zu beschäftigen haben, beginnend mit dem Auffangen der Schallwellen durch die Ohrmuschel und den Gehörgang und endend mit der Uebergabe derselben an das Labyrinthwasser, ein Weg auf welchem manche kunstreiche Vorrichtung unser Interesse in hohem Grade erregt. Obgleich vieles in diesen Vorgängen noch nicht mit genügender Sicherheit aufgeklärt ist, so ist doch namentlich seit den Untersuchungen von Helmholtz über das Trommelfell manches Wichtige unsern Blicken erschlossen, und dadurch der Weg zu neuen Forschungen gebahnt worden. An Räthselhaftem wird es freilich auch hier, wie überhaupt in der Natur nicht fehlen.

Wenn wir die Ohrmuschel des Menschen mit ihren sonderbar geschlungenen Leisten, Rinnen und Grübchen betrachten, so sollten wir meinen, dass die Natur alle diese Einzelheiten zu bestimmten Zwecken geschaffen habe, zumal die ästethische Form, die sich ihnen zugesellen kann, in der Natur oft auch auf einen praktischen Nutzen hinweist. Trotzdem dürfte es vom Standpunkte der Wissenschaft schwer sein, eine solche Meinung, die früher nicht wenig Anhänger gehabt hat, zu begründen, und wir gelangen zu einer ganz andern Ansicht, wenn wir, was in der Physiologie häufig am Platze ist, vom Menschen auf die Thierwelt zurückgehen, und die dort auftretenden Formen der Ohrmuscheln betrachten.

Zweifellos bildet die Ohrmuschel mit sammt dem Gehörgang ein trichterförmiges Hörrohr, welches wir z. B. bei Pferden in zweckentsprechender Form ausgebildet vorfinden, in Form eines wirklichen Trichters mit ziemlich glatten Wänden. Die auffallende Verstärkung des Schalles, welche ein trichterförmiges Höhrrohr erzeugt,

das man sich leicht aus Papier zusammenrollen und in den Gehörgang ansetzen kann, ist besonders merklich, wenn man das andere Ohr zustopft und auf das allgemeine Rauschen in der Luft achtet, oder noch besser, wenn man das Ticken einer auf den Tisch gelegten Uhr aus einer kleinen Entfernung mit und ohne das Rohr wahrzunehmen sucht. Die von der weiten Oeffnung aufgenommenen Schallwellen werden von den Wänden nach Innen hineinreflectirt und dadurch wächst die Intensität der Schallwelle, d. h. die Stärke ihrer Verdichtung und Verdünnung continuirlich. Während somit die Ohren der Pferde diese Aufgabe in hohem Grade erfüllen, und um so mehr dadurch, dass dieselben leicht nach allen Seiten hin beweglich sind, erscheinen die menschlichen Ohren zu diesem Dienste nur wenig tauglich. Denn erstens entfernt sich ihre Form sehr beträchtlich von der eines Trichters, der sich nur der innere an den Gehörgang stossende Theil *D* (Fig. 53) nähert, und zweitens ist die Ohrmuschel des Menschen meist unbeweglich, obgleich es Muskeln gibt, durch welche sie nach oben, nach rückwärts und vorwärts bewegt werden könnte. Selten aber besitzen Menschen die Herrschaft über ihre Ohrmuskeln, wie z. B. der berühmte Physiolog Johannes Müller, so, dass „die Ohren zu bewegen“ als ein besonderes Kunststück gilt.

Diesen Mangel an Beweglichkeit können wir uns daraus erklären, dass die Bewegung von keinem merklichen Nutzen begleitet sein kann, und wir daher keine Veranlassung haben eine solche zwecklose Bewegung einzuüben, sodass schliesslich der Wille seinen Einfluss auf jene Muskeln verliert. Indem dieser Zusammenhang der Erscheinungen auf die geringe Bedeutung der menschlichen Ohrmuschel als Hörrohr hinführt, wird letztere noch sicherer festgestellt durch einen Versuch, in welchem man sich nach Einsenkung eines kurzen Röhrchens in den Gehörgang, das ganze Ohr mit einer teigigen Masse gleichförmig bedeckt, ohne an Hörschärfe merklich einzubüssen.

Nichtsdestoweniger ist die Ohrmuschel nicht ganz ohne Einfluss, denn wenn wir durch die an das Ohr angelegte Hohlhand dieselbe künstlich vergrössern, so wird die Wirkung merkbar, weshalb Schwerhörige auf diese Weise das Gehör zu unterstützen suchen. Man hat daher auch zu ermitteln gesucht, ob der Winkel, den die Ohrfläche mit der Kopfwand macht, nicht von Einfluss auf die Hörschärfe ist, und will gefunden haben, dass ein Winkel von 40° der zweckmässigste in dieser Beziehung sei. Doch möchten wol die meisten Menschen aus ästhetischen Rücksichten auf einen so grossen Winkel verzichten, zumal ein Anlegen und Abheben der Ohrmuschel vom Kopfe kaum merkliche Unterschiede der Hörschärfe ergibt. Auch hat man behauptet, dass die Ohrmuschel vermöge ihrer Zusammensetzung aus elastischem Knorpel im Stande sein soll, die Schallwellen aus der Luft aufzunehmen und durch ihre Masse nach dem Gehörgang und dem Trommelfell zu leiten, und zu diesem Zwecke sei ihre Oberfläche durch soviel Falten vergrössert. Aber eine solche Rolle kann nur höchst unbedeutend sein, denn wenn wir uns die Ohren gut durch Siegellackpfröpfe verstopfen, so machen wir uns für die Luftleitung ganz taub, ohne dass uns die Muschel etwas Merkbares zuträgt. Ebenso wenig hören wir das Ticken der Uhr, wenn wir sie bei verschlossenem Gehörgang an den Ohrknorpel andrücken, während wir sie vom Knochenvorsprung hinter dem Ohr aus sehr deutlich wahrnehmen, sodass wir den Knorpel für einen schlechten Schallleiter halten müssen.

Eine andere Frage ist es, ob die Ohrmuschel dazu beiträgt die Richtung des Schalles zu erkennen. Ohne Zweifel sind wir im Stande über die Richtung des Schalles zu urtheilen, aber es ist auch aus Erfahrung bekannt, dass wir hierin mancherlei Täuschungen ausgesetzt sind. Wir erkennen nämlich den Ort der Schallquelle hauptsächlich dadurch, dass der Schall am stärksten empfunden wird, wenn der Gehörgang in gerader Linie der Schallquelle zugewendet ist. Zu diesem Zwecke wen-

den wir den Kopf so lange nach verschiedenen Richtungen, bis das untersuchende Ohr den Schall am stärksten hört. In diesem Falle ist nur ein Ohr thätig und der Schall muss auch längere Zeit anhalten, um untersucht werden zu können. Sehr oft aber erkennen wir mit Hülfe beider Ohren unmittelbar die Richtung eines Schalles ohne längeres Probiren dadurch, dass das eine Ohr, welches dem Schalle mehr zugewendet ist, denselben stärker empfindet als das andere. In diesem Falle spielt das Hören mit beiden Ohren eine nicht unwichtige Rolle, die wir einigermassen dem Sehen mit beiden Augen vergleichen können, obwol es sich hier nicht um Schätzung der Entfernung, sondern nur um die der Richtung handelt. Aber ähnlich wie wir beim Sehen mit einem Auge zur Bestimmung von Entfernungen die Kopfbewegungen zu Rathe ziehen müssen, so müssen sie auch dem Horchen mit einem Ohr zu Hülfe kommen. Da wir jedoch in der Bestimmung der Richtung selbst mit Hülfe beider Ohren nicht sehr sicher sind, so machen wir fast immer beim aufmerksamen Suchen der Schallquelle Kopfbewegungen..

Bei dieser Thätigkeit nun leistet die Ohrmuschel in der That einige merkliche Dienste. Wenn wir nämlich das Ohr einer Schallquelle zuwenden, so steht die Muschel ungefähr am günstigsten für die Reflexion von Wellen zum Gehörgang, weniger günstig, wenn der Schall von vorn kommt, und am ungünstigsten, wenn der Schall von hinten kommt, weil die direct anlangenden Schallwellen abgefangen werden. Wir können daher wol beurtheilen, ob ein Schall von vorn oder hinten kommt, besonders wenn wir schon Erfahrungen über die gewöhnliche Stärke des Schalles haben, und noch besser, wenn wir durch Wenden des Kopfes Vergleichungen anstellen.

Es ist aber auch von Ed. Weber die Annahme ausgesprochen worden, dass die Ohrmuschel im Stande sei, die Richtung der anlangenden Schallwellen zu empfinden, indem sie selbst in Schwingung versetzt werde, und wir

dadurch beurtheilen könnten, ob die vordere oder hintere Fläche derselben von den Schallwellen getroffen werde. Hiermit soll folgende von Weber gemachte recht interessante Beobachtung im Zusammenhange stehen. Wenn wir auf einen von vorn kommenden Schall achten, und beide Hände, nach hinten gerichtet, so vor das Ohr an den Kopf ansetzen, dass die Hohlhände gleichsam Ohrmuscheln bilden, dann haben wir die Täuschung, als ob der Schall von hinten kâme. Weber meinte, dass während in diesem Falle die Hände die Rolle von Ohrmuscheln spielten, sie auch zu empfinden vermögen, dass ihre Rückenfläche von den Schallwellen getroffen würde und wir deshalb glaubten, der Schall käme vom Rücken her. Wenn diese Erklärung richtig wäre, so müssten wir annehmen, dass die Tastnerven der Ohrmuschel und der Hände die Wellenbewegung der Luft zu fühlen im Stande seien, denn besondere Nervenendapparate anderer Art sind darin nicht vorgefunden worden. Nun ist aber die Tastempfindung der Ohrmuschel viel schwächer als die der Hohlhand, und mit der Hohlhand fühlen wir Schallwellen als solche gewiss nicht, z. B. nicht, wenn wir eine offne Lippenpfeife, während sie tönt, oben mit der Hand zudecken. Es ist daher nicht wahrscheinlich, dass die Haut der Ohrmuschel die Richtung der Schallwellen fühlen sollte.

Viel einfacher erklärt sich das Vermögen, die Richtung des Schalles von hinten und vorn zu unterscheiden, aus der Schwächung des Schalles, welcher von hinten kommt, und der Weber'sche Versuch mit vorgehaltenen Hohlhänden besteht darin, dass die Hand den Schall ungefähr in der Art dämpft, wie wenn er von hinten käme.

Weber hat auch beobachtet, dass wir die Richtung von vorn und hinten sehr schlecht unterscheiden, wenn wir uns die Ohrmuscheln platt an den Kopf andrücken, was sich auf beide Weisen wohl erklären lässt, nach Weber, weil nun die hintere Fläche von den Schallwellen gar nicht berührt wird, nach unserer Auffassung, weil die

Verhältnisse der Schallzuleitung von beiden Richtungen sich ziemlich ausgleichen.

Schliesslich müssen wir noch hinzufügen, dass man die Ohrmuschel auch als Schutzorgan für das innere Ohr zu betrachten hat. Wie die Augenlider vielen Schädlichkeiten den Zugang zum Auge verwehren, so ist auch die Ohrmuschel geeignet, Staub, kleine Körperchen, die leicht durch die Luft in den Gehörgang hineingeweht werden könnten, und auch einkriechende Insekten, abzuhalten; zwar nicht durch abschliessende Bewegungen, wol aber beim Menschen gerade durch ihre eigenthümlich gewundene Form, welche den Eingang schwer finden lässt. Auch ist letzterer mehr oder weniger mit Härchen besetzt, welche dazu dienen, eindringenden Staub abzufangen und die, wie es scheint, den Schall nicht wesentlich dämpfen.

Der Gehörgang, welcher anfangs aus Knorpel nach innen zu aus Knochen gebildet wird, ist, wie wir auf der Abbildung sehen, kein gerades Rohr von gleichmässiger Weite. Nahe seinem Eingang zeigt er eine Verengerung, welche sich nach oben hin windet, und endet dann sich etwas erweiternd am Trommelfell, dessen Ebene im ganzen schräg nach unten und innen gestellt ist. Von den Wänden wird eine fettige Substanz, das Ohrenschmalz, abgesondert, das in kleinen Drüsen bereitet wird und wol die Aufgabe hat, die Wände und vielleicht auch das Trommelfell geschmeidig zu erhalten und vor Trockenheit zu schützen. Hingegen kann eine zu starke Absonderung desselben schädlich sein und durch Verstopfung Schwerhörigkeit erzeugen.

Dass die Krümmungen des Gehörganges die Zuleitung des Schalles wesentlich beeinflussen, ist nicht anzunehmen, denn wenn wir durch ein Kautschukrohr einen Schall wahrnehmen, so ist es ziemlich gleichgültig, ob dasselbe gestreckt oder gekrümmt liegt, weil die Reflexion an den Wänden es bewirkt, dass die Schallwelle sich fast ungeschwächt fortpflanzt. Eine beson-

dere akustische Aufgabe dürften daher jene Krümmungen nicht zu erfüllen haben, vielleicht nur eine schützende, welche darin besteht, eindringenden Staub vom Trommelfell fernzuhalten.

Eine besondere Resonanz des Gehörganges ist von Helmholtz nachgewiesen worden. Wie jeder eingeschlossene Luftraum einen Eigenton zeigt, wenn er angeblasen wird, wie die Lippenpfeife, eine Flasche, eine Hohlkugel u. s. w., so muss auch der Gehörgang einen solchen Eigenton besitzen. Derselbe ist ziemlich hoch, sodass Töne von derselben Höhe infolge starker Resonanz uns schrill und unangenehm vorkommen, wie z. B. die sehr hohen Violintöne oder der Ton der Fledermaus. Vielleicht beruht auch darauf zum Theil die unangenehme Empfindung, welche wir beim Kritzeln von Metall auf Glas oder Porzellan haben. Im ganzen werden durch die Resonanz des Gehörganges die hohen Töne etwas verstärkt, die tiefen etwas gedämpft; eine Wirkung welche wir variiren können, wenn wir Papierröhrchen in den Gehörgang stecken und durch diese künstliche Verlängerung desselben den Eigenton tiefer machen.

---

## Drittes Kapitel.

### Das Trommelfell, die Paukenhöhle, die Gehörknöchelchen und die Ohrtrompete. — Die Schwingungen des Trommelfells und der Gehörknöchelchen.

Das Trommelfell bildet keine ebene Fläche, sondern zeigt einen Buckel, welcher in die Paukenhöhle hineinragt und Nabel genannt wird. Derselbe entsteht durch die Verbindung mit dem Stiel des Hammers, welcher an dem Trommelfell in seiner ganzen Länge festgewachsen ist, und dessen Ende mit der

Spitze des Nabels zusammenfällt. In Fig. 53 ist dieses Verhältniss im allgemeinen angedeutet, Fig. 64 erläutert uns nach den Angaben von Helmholtz das Trommelfell in seiner Verbindung mit dem Hammer von der Paukenhöhle aus gesehen, Fig. 65 die drei Gehörknöchelchen. Man sieht, wie das Trommelfell durch den Stiel des Hammers nach innen trichterförmig eingezogen ist, und dass die Spitze des Trichters oder Nabels unterhalb der Mitte jenes sich befindet. Dabei ist das Trommelfell vom Rande nach dem Nabel zu innen concav, nach aussen dem Gehörgange zu segelartig convex ausgebuchtet. Der Rand des Trommelfells ist an einem

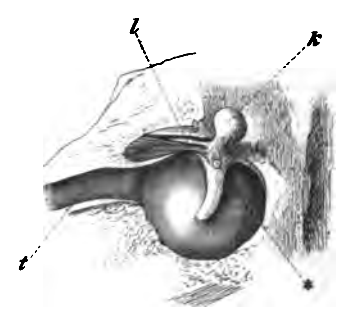



*Fig. 64.*

knöchernen Ring befestigt. Im innern der Membran befinden sich sehnige Fasern, welche sowol in radiärer als auch in kreisförmiger Richtung ausgespannt sind. In der Figur sehen wir noch einige Einzelheiten, unter denen wir den Kopf des Hammers *k*, seinen langen Fortsatz *l*, einen Punkt *, wo sich die Sehne eines Muskels des Trommelfellspanners ansetzt, hervorheben. Wir sehen ferner ein Band, welches den Hammer befestigt, unterhalb des Kopfes, und die Mündung der Ohrtrompete *t*.

In Fig. 65 erblicken wir die drei Gehörknöchelchen, vierfach vergrössert, in ihrer Gestalt und Verbindung miteinander. Der Kopf des Hammers, welcher über den obern

Rand des Trommelfells hinausragt, besitzt eine Gelenkfläche, welche sich dem Ambos *Am* zuwendet. Ausser dem langen Fortsatz *l* steht dicht unter dem Hals des Hammerkopfes ein kurzer Fortsatz, in der Zeichnung nicht sichtbar, welcher nach aussen gerichtet gegen den obern Rand des Trommelfells drückt und es hier ein klein wenig nach aussen stülpt.

Der Ambos hat im ganzen die Gestalt eines zweiwurzligen Backzahns, dessen Kaufläche mit dem Hammerkopf ein Gelenk bildet. Von seinem Körper gehen wurzelartig zwei Fortsätze ab, von denen die kürzere *Am. k* sich gegen die hintere Paukenhöhlenwand wendet

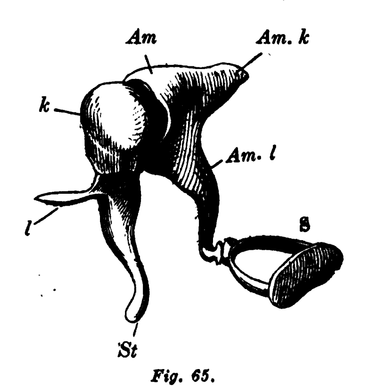



*Fig. 65.*

und an ihr durch Bänder befestigt ist, während der längere *Am. l* frei in das Innere der Paukenhöhle hineinragt und mit einem kleinen Gelenk endet, das sich mit dem Köpfchen des Steigbügels *S* verbindet. — Der Steigbügel, dessen Form seiner Bezeichnung nach in die Augen springt, besitzt eine ovale Fussplatte, welche nach innen schauend, gegen das ovale Fenster der Paukenhöhle stösst.

Die Pauken- oder Trommelhöhle ist eine ziemlich schmale Höhle, die sich über den obern Rand des Trommelfells hinauferstreckt. Man kann sie mit einer

Trommel vergleichen, die nur an einer Seite mit einem Fell, dem Trommelfell überzogen ist. Doch weicht sie von der Trommelform ab, vorzüglich dadurch, dass sie nach unten, vorn und innen in die Ohrtrompete übergeht.

Welchem Zweck dient nun dieser Kanal, der zur Rachenhöhle führt? — Die Paukenhöhle ist ein mit Luft erfüllter Raum im Innern eines Knochens. Diese Luft würde, wenn sie von der atmosphärischen Luft ganz abgeschlossen wäre, bald ihre Zusammensetzung ändern, wahrscheinlich würde sie ganz vom Blute aufgesogen und durch abgesonderte Flüssigkeit ersetzt werden, wenn nicht eine fortwährende Erneuerung möglich wäre. Diese erfolgt durch die Ohrtrompete, welche von Zeit zu Zeit einen Luftaustausch zulässt; und noch mehr als eine blosse Erneuerung der Luft findet durch diesen Kanal statt, es vollzieht sich durch ihn ausserdem eine Ausgleichung des Luftdrucks in der Paukenhöhle, und dies ist für die Function des Trommelfells von grosser Wichtigkeit. Denn sobald der Luftdruck der Atmosphäre grösser wird, muss das Trommelfell nach innen gedrängt werden und wird er kleiner, so muss es nach aussen gewölbt werden. Beides wäre für die Bewegungen des Trommelfells von Nachtheil, und da hilft denn die Ohrtrompete aus, welche zur geeigneten Zeit Luft ein- und auslässt. Dieselbe ist aber nicht dauernd offen, sondern für gewöhnlich geschlossen und öffnet sich nur, wenn wir eine Schlingbewegung ausführen, eine Bewegung, die nicht nur beim Essen, sondern auch in der Zwischenzeit ziemlich oft zur Hinabbeförderung des abgesonderten Speichels erfolgt und daher ihre Aufgabe im Dienste des Ohres zur Genüge erfüllt.

Valsalva, ein hervorragender Anatom des 17. Jahrhunderts, hat durch folgenden Versuch bewiesen, wie sich beim Schlingen die Ohrtrompete öffnet: man halte sich die Nase zu und blase mit fest geschlossenem Munde die Backen tüchtig auf. Nun mache man in diesem Zustande eine Schlingbewegung, ohne die Luft aus dem

Munde herauszulassen, was man nach einiger Uebung leicht erreicht, und man fühlt sofort einen eigenthümlichen Druck in beiden Ohren, der dadurch entsteht, dass Luft durch die Ohrtrompete in die Paukenhöhle hineingepresst worden ist und das Trommelfell nach aussen gedrängt hat. Dieses Gefühl bleibt bestehen, bis wir eine neue Schlingbewegung machen, welche die Luft wieder entweichen lässt.

Man kann auch auf ähnliche Weise die Luft in der Paukenhöhle verdünnen. Wir schliessen Mund und Nase, verdünnen durch eine starke Einathmung die Luft in der Rachenhöhle und machen gleichzeitig eine Schlingbewegung. Dadurch wird dann Luft aus der Paukenhöhle hinausgesogen, das Trommelfell wird weiter nach innen gewölbt und ein ähnliches Gefühl der Spannung im Ohr erzeugt, von welchem uns die nächste Schlingbewegung wieder befreit. Während des Valsalva'schen Versuchs aber sind unsere Gehörsempfindungen dumpf und abgeschwächt, woraus hervorgeht, dass das Trommelfell in dem Zustande abnormer Spannung nicht den gewöhnlichen Dienst thut.

Die Oeffnung der Ohrtrompete geschieht durch Muskeln, die sich an die knorplichen Wandungen derselben ansetzen und sich beim Schlingen mit bewegen. Eine naheliegende Frage, welche sich an diesen Vorgang knüpft, ist die, wesshalb die Trompete nicht fortwährend offen, sondern meist geschlossen ist, und nur momentan geöffnet wird, um schnell wieder geschlossen zu werden. Wenn dieser Kanal zum Luftaustausch bestimmt ist, so wäre es ja viel einfacher, wenn er jederzeit offen wäre.

Mit einiger Sicherheit lässt sich auf diese Frage wol Antwort geben. Man kann einmal daran denken, dass die offene Ohrtrompete auch Schallwellen direct in die Paukenhöhle leiten würde. Dass dies möglich ist, kann man nachweisen, wenn man ein Rohr in die Ohrtrompete einführt und durch dieses einen Schall zuleitet. Wir würden daher bei offner Ohrtrompete namentlich unsere

eigene Stimme mit dröhnender Stärke wahrnehmen, und wenn es auch Menschen gibt, die ihre eigene Stimme mit grosser Vorliebe hören, so dürfte eine derartige Verstärkung derselben für die Dauer selbst solchen lästig fallen.

Es würden auch ferner, wenn die Ohrtrompete offen wäre, das Aus- und Einströmen der Luft beim Athmen eine Bewegung der Paukenluft und dadurch eine Einwärts- und Auswärtsbeugung des Trommelfells verursachen. Kurzum, wir erkennen, dass die Sperrung jenes Kanals entschieden von praktischer Bedeutung ist, und dass es eines besondern Mechanismus bedarf, ihn von Zeit zu Zeit zu öffnen.

Es läge ferner noch die Möglichkeit vor, dass die offne Ohrtrompete die Schwingungen des Trommelfells und namentlich die Resonanz der Paukenluft veränderte. Denn wenn wir eine Trommel anschlagen, so ändert sich der Ton, sobald man in der Wand eine Oeffnung anbringt. Doch bedarf es noch theoretischer und experimenteller Untersuchung, um einen ähnlichen Einfluss der Ohrtrompete nachzuweisen.

Dieser Kanal ist schliesslich noch ein Abzugsrohr für die Absonderungen, welche auf der Schleimhaut der Paukenhöhle stattfinden. Der Durchgang nach der Rachenhöhle hin ist daher viel leichter passirbar, als in umgekehrter Richtung, in welcher die Wände ventilartig zusammenklappen. Durch Katarrh der Schleimhaut daselbst kann auch die Ohrtrompete unwegsam werden, und dann entsteht durch den Mangel der Lufterneuerung in der Paukenhöhle und durch Ansammlung von Schleim daselbst ein grösserer oder geringerer Grad von Schwerhörigkeit, wesshalb als Mittel gegen dieses Uebel von den Ohrenärzten das Einführen elastischer Röhrchen in die Ohrtrompete angewendet wird.

Zu den festen Körpern, deren Schwingungen einen Ton zu erzeugen im Stande sind, gehört unter andern auch eine gespannte Membran, durch deren Anschlagen, z. B. in der Trommel, der Ton erzeugt wird. Die

Schwingungen, welche in derselben entstehen, sind transversal, und wir können uns vorstellen, dass jeder Durchmesser einer kreisrunden Membran gleichsam wie eine Saite Schwingungen ausführt. Zu einer Trommel gehört jedoch noch als wesentlicher Theil der cylinderförmige abgeschlossene Luftraum, welcher den Ton durch Resonanz bedeutend verstärkt, wenn sein Eigenton mit dem der Membran übereinstimmt. Eine über einen Ring frei ausgespannte Membran ohne Trommel gibt nur einen mässig starken Ton.

Das Trommelfell des Ohres wird nun nicht durch Anschlag fester Körper, sondern durch die Schallwellen der Luft in Schwingung versetzt. Der Vorgang findet hier also in umgekehrter Richtung statt, als bei einer Trommel. Denn bei dieser setzen die Trommelstöcke das Fell, dieses die innere Luftmasse und zugleich die umgebende Luft in Mitschwingung, im Ohre dagegen schlägt die Schallwelle gegen ein ausgespanntes Fell und dieses gegen sehr kunstvoll geformte Trommelstöcke, die Gehörknöchelchen, welche die Schwingung weiter tragen.

Es interessirt vor allem zu erfahren, in welcher Weise das System der Gehörknöchelchen in Verbindung mit dem Trommelfell und der Membran des ovalen Fensters seine Schwingungen ausführt. Von dem Trommelfell kann es nicht zweifelhaft sein, dass es vermöge seiner Dehnbarkeit nur transversale Schwingungen macht, indem es von der Schallwelle in Bewegung gesetzt wird. So einfach wie die Schwingungen einer frei ausgespannten ebenen Membran sind zwar, wie wir sehen werden, die des Trommelfells nicht, doch im grossen und ganzen stimmen sie mit jenen in ihrer Form überein.

Ein ander Ding ist es mit den Gehörknöchelchen. Diese sind feste, zum Theil unregelmässig, zum Theil stabförmig gestaltete Körperchen, deren Schwingungen, wie man annehmen sollte, sehr unregelmässig sein müssten. Ein an einem Ende befestigter Stab kann nun, wie wir wissen, transversale Schwingungen

machen, wenn er an dem freien Ende zur Seite gezogen und losgelassen wird. Er kann auch longitudinale Schwingungen machen, wenn er in seiner Längsrichtung gerieben wird. Man beobachtet nun, dass sich durch starre feste Körper der Schall sehr gut fortpflanzt. Wenn wir z. B. unser Ohr an einen horizontal liegenden Baumstamm oder an eine Mauer anlegen, und an einer entferntern Stelle leise klopfen lassen, so nehmen wir den Schall sehr gut wahr, während er durch die Luft nicht gehört wird. Bekannt ist ferner, dass man durch das Erdreich fernes Pferdegetrappel viel stärker wahrnimmt als durch die Luft. Alle Schallschwingungen, die sich durch feste starre Körper fortpflanzen, bestehen hauptsächlich aus longitudinalen Schwingungen. In dem Baumstamm z. B. finden keine Schwingungen seiner ganzen Masse nach der einen oder andern Richtung hin statt; er biegt sich nicht etwa dahin und dorthin, wie eine festgeklemmte in Schwingung versetzte Feder, sondern die Schwingung findet im Innern in seinen kleinsten Theilchen statt, welche vorzüglich in der Längsrichtung hin- und herschwingen. Reine longitudinale Schwingungen der kleinsten Theilchen finden sonst nur in dünnen der Länge nach gestrichenen Stäben statt.

Man könnte nun meinen, dass solche longitudinale Schwingungen in der Masse der Gehörknöchelchen entständen, denn die Knochensubstanz ist sehr geeignet derartige Schwingungen fortzupflanzen, was wir namentlich aus der oben besprochenen Knochenleitung erkennen. Diese Ansicht hat manche Vertreter gefunden, aber die Gehörknöchelchen sind, wie Helmholtz hervorgehoben hat, in ihren Dimensionen so winzig gegenüber der Länge einer Schallwelle, dass an einen derartigen Vorgang gar nicht gedacht werden kann. Die Schallwellen der mittlern Töne besitzen in der Luft eine Länge von circa einem halben bis einem Meter, in den festen Körpern sind sie noch länger, weil sich der Schall in ihnen mit grösserer Geschwindigkeit fort-

pflanzt. Nun sind aber die Gehörknöchelchen nirgends unbeweglich festgeklemmt und wegen ihrer geringen Masse ausserordentlich leicht, sodass ein Stoss, der an einem Ende auf sie einwirkt, gleich die ganze Kette der Knöchelchen in Bewegung setzen muss. Wenn daher eine Schallwelle auf den Hammer einwirkt, so ist es nicht denkbar, dass sich diese Bewegung wellenartig wie durch einen schweren Baumstamm bis zum Steigbügel fortpflanze, denn eine Schallwelle ist so lang, dass alle Theilchen der drei Knöchelchen fast gleichzeitig in einem einzigen Punkte der ganzen Welle liegen, und daher eine gemeinsame Bewegung nach derselben Richtung machen müssen.

Wir kommen daher auf die einzige Möglichkeit zurück, dass die Gehörknöchelchen transversale Schwingungen ausführen, und eine genauere Betrachtung ihres Zusammenhanges miteinander wird uns lehren, in welcher Weise sie erfolgen.

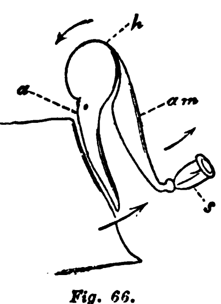


*Fig. 66.*

Der Griff des Hammers ist in seiner ganzen Länge mit dem Trommelfell verwachsen, während der Kopf über dem Rande desselben in die Trommelhöhle hineinragt. Der Hals des Hammers, sein kurzer und langer Fortsatz, ist aber ausserdem durch elastische Bandmasse mit Knochenpunkten verbunden, und diese Bänder bilden eine Axe, das Axenband genannt, um welches der Hammer hin- und herschwingen kann. Das Axenband geht ungefähr von vorn nach hinten durch den Hals des Hammers hindurch, und ist in Fig. 66 durch den Punkt *a* hindurchzulegen. Alle Punkte des Hammers unterhalb des Axenbandes werden bei der Einwärtsschwingung des Trommelfells nach innen, alle oberhalb gelegenen nach aussen getrieben, wie es die Pfeile anzeigen. Während nun der Hammergriff nach

Innen, der Hammerkopf nach aussen schwingt, wird der Ambos durch das Gelenk mit dem Hammerkopf in Bewegung versetzt und zwar so als ob dieses Gelenk eine ganz feste Verbindung herstellte. Dasselbe besitzt nämlich eine eigenthümliche Form, welche man nach den Untersuchungen von Helmholtz in ihrer mechanischen Wirkung Sperrzähnen vergleichen kann. Diese greifen so ineinander ein, dass der Körper des Ambos mit dem Hammerkopf nach hinten, der lange Fortsatz aber in derselben Richtung wie der Hammerstiel nach oben und innen gedreht wird. Dadurch erhält, wie wir sehen, der Steigbügel ebenfalls einen Stoss nach Innen und klopft mit seiner Fussplatte gegen das ovale Fenster, wodurch der Schallwelle der Eingang in das Labyrinth eröffnet wird.

Dass beim Rückschwung alle Bewegungen in der umgekehrten Richtung erfolgen müssen, ist selbstverständlich. Wir haben nur noch hervorzuheben, dass hierbei die Sperrzähne des Hammer-Ambosgelenkes nicht ineinander greifen. Wenn daher durch irgendeinen Umstand, z. B. durch starken Luftdruck in der Paukenhöhle, das Trommelfell nach aussen getrieben wird und, indem es den Hammerstiel mitnimmt, den Hammerkopf stark nach innen bewegt, so heben sich die Gelenkflächen voneinander ab, und es wird verhütet, dass der Steigbügel aus dem ovalen Fenster herausgerissen wird (s. Fig. 66).

Das System der Gehörknöchelchen macht sonach eine gemeinsame gleichzeitige Bewegung um eine gemeinsame Axe, das Axenband. Eine solche Bewegung können wir eine Hebelbewegung nennen, und zwar haben wir es hier mit einem zweiarmigen Hebel zu thun, in der Form eines Winkelhebels, ähnlich wie er an Klingelzügen angebracht ist, um den Draht in anderer Richtung fortzuführen. Der eine Hebelarm, an welchem die Kraft des schwingenden Trommelfells wirkt, ist der Hammerstiel, der zweite Hebelarm ist der Hammerkopf mit dem Ambos und Steigbügel, welcher die Masse des Labyrinthwassers in Bewegung setzt.

Die Schwingungen der Gehörknöchelchen sind also in der That transversale, aber sie sind keineswegs analog den Schwingungen einer gespannten Saite oder einer festgeklemmten Feder, denn die Knöchelchen sind nirgends festgeklemmt und schwingen nicht vermöge ihrer Elasticität, sondern sie werden als sehr leichte, drehbare Hebelchen durch die Trommelfellschwingungen in Mitbewegung versetzt

Es ist auch am ausgeschnittenen Organ des Menschen beobachtet worden, dass die Knöchelchen in genannter Weise ihre Schwingungen ausführen, indem man einen kleinen glänzenden Punkt auf ihnen unter dem Mikroskop betrachtet hat, während man mit dem Gehörgang eine tönende Orgelpfeife in Verbindung setzte. Der glänzende Punkt erschien dann in der Richtung der Bewegung als ein heller kleiner Strich.

Die Gehörknöchelchen dienen, wie man sieht, als ein Hebelwerk, welches Trommelfell und ovales Fenster verbindet, und die Kraft vom erstern auf letzteres überträgt. Während sie durch ersteres in Bewegung gesetzt werden, spielen sie wie Trommelstöcke gegen die Membran des ovalen Fensters, nur mit dem Unterschiede, dass sie an dieser Membran ebenso wie am Trommelfell festgewachsen sind und sich nicht von ihnen abheben können.

---

## Viertes Kapitel.

Die Function des Trommelfells, das Telephon. — Die schwingenden Flammen. — Die Bedeutung der trichterförmigen Gestalt des Trommelfells. — Die Muskeln in der Trommelhöhle.

Wenn wir eine Membran über die Oeffnung eines Rohres oder über einen Ring ausspannen, so zeigt dieselbe beim Anschlagen einen Ton, ihren Eigenton, wel-

cher mit der Spannung der Membran an Höhe zunimmt und mit ihrer Vergrösserung an Höhe abnimmt. Wenn wir ferner in der Nähe der Membran denselben Ton erklingen lassen, was am einfachsten dadurch geschieht, dass wir sie ansingen, so geräth sie in Mitschwingung, ähnlich wie eine Fensterscheibe klirrt, wenn ihr Eigenton stark erklingt. Wenn wir aber einen andern Ton singen, so bleibt die Membran in Ruhe, und erst wenn wir uns dem Eigenton nähern, beginnt die Mitschwingung oder die Resonanz immer stärker zu werden. Man erkennt die Resonanz einer solchen Membran sehr leicht, wenn man feinen Sand darauf streut, der durch die Schwingungen in tanzende Bewegung geräth.

Man sollte meinen, dass das Trommelfell auch einen solchen Eigenton besitze. Aber es stünde sehr schlecht um unser Hören, namentlich um unsere musikalische Wahrnehmung, wenn sich das Trommelfell so verhielte wie eine einfache glattausgespannte Membran. Denn in diesem Falle würden wir den Eigenton des Trommelfells mit mächtiger Stärke ertönen hören, und von diesem Tone ab die übrigen mit schnell abnehmender Intensität, sodass wir die meisten Töne nur ganz schwach wahrnehmen würden.

Das Trommelfell hat also offenbar, wie die Erfahrung lehrt, die höchst merkwürdige Eigenschaft, auf Töne beliebiger Höhe innerhalb der von uns unterscheidbaren Tonscala von circa 60—4000 Schwingungen in der Secunde gleich gut anzusprechen, was eine gewöhnliche gespannte Membran nie und nimmer thut.

Es gibt einige künstliche Vorrichtungen, in denen Membranen auf eine grössere Reihe von Tönen mitschwingen und die daher einige Aehnlichkeit mit dem Trommelhöhlenapparat besitzen. Wir haben hier zunächst ein sehr interessantes Instrument, das Telephon von Reiss zu nennen. Dasselbe löst die Aufgabe, Töne auf telegraphischem Wege zu befördern, sodass man damit ein Lied recht gut telegraphiren könnte. Die Construction ist folgende:

Ein Kasten *A* (Fig. 67) besitzt ein Rohr *R* durch welches man in denselben hineinsingen kann. In dem Deckel befindet sich eine Membran aus trockner Thier-

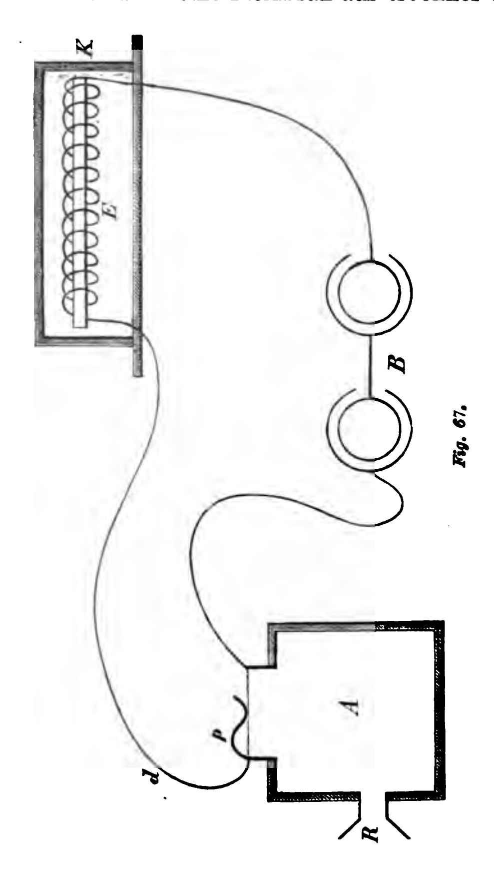


Fig. 67.

blase, die nur eine geringe Spannung besitzt und daher einen sehr tiefen Eigenton hat. An einer Stelle befindet sich ein Staniolstreifen, der vom Rande bis

zur Mitte geht, und hier ruht auf demselben ein leichtes Metallplättchen *P*, welches zu dem Leitungsdrahte *d* führt. Nach der andern Seite führt ein Draht zur elektrischen Batterie *B* und von dieser ein Draht zur Vorrichtung *K*, welche an einer entfernten Station aufgestellt werden kann. Diese Vorrichtung besteht aus einem Resonanzkasten *K*, in welchem ein dünner Elektromagnet *E*, umwickelt von einer Spirale, liegt, die vom Strome durchflossen wird. Ein solcher Elektromagnet hat nun die Eigenschaft Töne zu geben, deren Höhe von der Anzahl der Ströme abhängt, die ausserordentlich schnell aufeinander folgen. Die Schwingungszahl des Tones ist dann der Zahl der durchgeleiteten Ströme gleich.

Wenn wir nun in den Kasten *A* hineinsingen, so geräth die Membran in Schwingung. Das Plättchen *P* tanzt dann auf dem Staniolplättchen, und zwar finden dabei in der Secunde ebenso viel Berührungen und Unterbrechungen statt, als der gesungene Ton Schwingungen macht. Es entstehen in der Secunde ebenso viel kurzdauernde Ströme und der Elektromagnet gibt den gesungenen Ton, der durch den Resonanzkasten verstärkt wird.

Innerhalb der Scala einer gewöhnlichen Singstimme reagirt nun der Apparat ziemlich gut, die Membran schwingt also auf eine grössere Reihe von Tönen mit, ähnlich wie unser Trommelfell. Das erklärt sich daraus, dass die Membran keine ganz gleichmässige Spannung und im ganzen einen sehr tiefen Eigenton besitzt. Infolge dessen wird sie namentlich in einzelnen Partien durch die Luftschwingungen im Kasten *A* mitbewegt, indem sie sich in mehrere schwingende Abschnitte theilt, und sich auf ihr sogenannte Knotenlinien bilden, welche die schwingenden Abschnitte voneinander trennen. Auf Töne verschiedener Höhe werden dann verschiedenartig begrenzte Abschnitte der Membran mitschwingen. Von Einfluss ist hier ferner die Belastung der Membran durch das Metallplättchen *P*. Dieses

dämpft jede Eigenschwingung und namentlich auch jede Nachschwingung der Membran, ist aber leicht genug, um durch einen stark gesungenen Ton in Mitbewegung versetzt zu werden. Die Folge dieser Umstände ist nun, dass die Membran sich einer grössern Reihe von Tönen vollkommen accommodirt. Wir können dieselbe recht passend dem Trommelfell vergleichen, und das Metallplättchen den Gehörknöchelchen.

Eine andere sinnreiche Vorrichtung, die ebenfalls in ihrer Wirkung dem Gehörapparat nahe steht, sind die schwingenden Flammen von König.

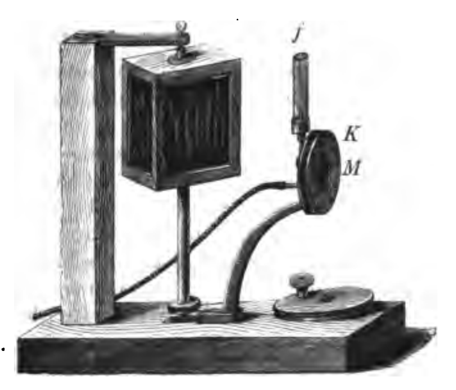



*Fig. 68.*

Ein Kasten *K* (Fig. 68) trägt an einer Seite eine Membran aus Kautschuk *M*, über die ein Trichterrohr eingesetzt ist, welches in der Figur fortgelassen ist. Durch den Kasten wird Leuchtgas hindurchgeleitet, welches oben in der Flamme *f* brennt. Die Membran, welche ursprünglich ganz schlaff ist, wird durch den Gasdruck etwas nach aussen gebuchtet, besitzt also keine sehr starke Spannung und einen sehr tiefen kaum hörbaren Eigenton. Sie geräth daher durch eine ziemlich grosse Reihe von Tönen, welche man in das Rohr hinein-

singt, in Mitschwingung, und das dadurch ebenfalls in Schwingung versetzte Gas erzeugt ein Schwingen der Flamme, welches so schnell vor sich geht, dass wir es durch gewöhnliche Beobachtung nicht merken können. Zu ihrer Wahrnehmung dient der Würfel, welcher vier spiegelnde Flächen besitzt und in schnelle Rotation versetzt wird.

Wenn nun die Flamme ruhig brennt, während man nicht in das Rohr hineinsingt, so sieht man im Spiegel eine gerade helle Linie. Sobald man aber hineinsingt, sieht man eine getrennte Anzahl von Flammenspitzen, weil die Flamme auf- und abflackert, und jedes Aufflackern ein momentanes Bild gibt. Je höher der Ton ist, um so näher rücken die Flammenbilder, je tiefer, um so weiter stehen sie auseinander, weil die Zahl der Flammenbilder der Schwingungszahl des Tones gleich sein muss.

Auch hier haben wir es mit einer Membran zu thun, welche in ihrer Eigenschaft dem Trommelfell nahe kommt, denn sie ist im Stande auf Töne verschiedener Höhe zu reagiren, und dies erklärt sich ebenfalls daraus, dass sie selbst einen sehr tiefen Eigenton besitzt. Von Wirkung ist hier ferner die Gasmasse, welche durch ihren Druck die Membran gleichsam belastet und ihre Eigenschwingungen dämpft.

Finden wir nun ähnliche Eigenschaften am Trommelfell vor, welche dasselbe befähigen, durch eine so grosse Scala von Tönen in Schwingung versetzt zu werden? — Allerdings ist dies der Fall.

Zwei Momente sind es, welche dem Trommelfell jene Eigenschaft verleihen: Erstens die trichterförmige Gestalt, wodurch dasselbe ungleichmässig und nur wenig gespannt ist. Zweitens die Belastung des Trommelfells durch die Kette der Gehörknöchelchen.

Es ist von Helmholtz nachgewiesen worden, dass eine solche trichterförmig gestaltete Membran sehr merkwürdige Eigenschaften besitzt.

Wenn wir eine Kautschukmembran über ein weites

Rohr spannen und sie in ihrer Mitte mit einem Stabe senkrecht nach innen drücken, so bildet sie eine trichterförmige Fläche. Ausserdem aber bemerken wir, dass die Fläche nach aussen hin convex gekrümmt ist. Diese Membran besitzt nun in verschiedener Entfernung vom Mittelpunkte verschiedene Spannung, und zwar nimmt die Spannung nach dem Mittelpunkte hin zu. Das erkennen wir daran, dass die Membran nach der Mitte hin stärker gedehnt und dünner ist, sodass sie bei übermässiger Dehnung in der Mitte zuerst reissen würde.

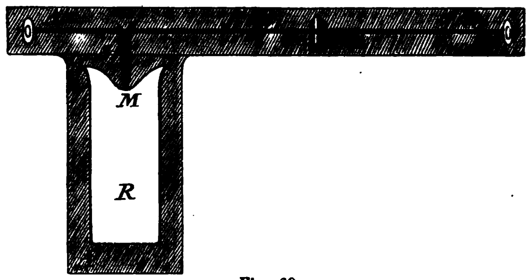



*Fig. 69.*

Eine solche Membran hat aber keinen gemeinsamen Eigenton, weil sie keine gleichmässige Spannung besitzt. Auch das Trommelfell hat im Princip dieselbe Gestalt, indem sich vom Nabel aus die Radien convex nach aussen hin erstrecken. Dazu kommt noch, dass das Trommelfell keine sehr dehnbare Membran ist, und seine Spannung reicht gerade dazu aus, es etwas straff nach innen zu ziehen, ohne dass diese Spannung einen hörbaren Eigenton erzeugen könnte. Eine solche Membran ist nun ausserordentlich gut dazu geeignet, Schwingungen verschiedener Schnelligkeit fortzupflanzen, was von Helmholtz durch folgende Vorrichtung experimentell nachgewiesen worden ist. In Fig. 69 ist auf einem Brett *AA* ein Rohr *R* horizontal angebracht, über welches eine trichterförmig

gestaltete Membran *M* aus Thierblase aufgebunden ist. Ein Holzstäbchen *St* verbindet die Mitte der Membran mit der ausgespannten Saite *S*. Wenn wir die Saite mit einem Violinbogen anstreichen, so gibt sie einen sehr vollen Ton, weil die Membran die Schwingungen sehr leicht an die Luft abgibt. Nehmen wir dagegen das Holzstäbchen fort, so ist der Ton der Saite matt und schwach, weil ihre Schwingungen schlecht an die Luft abgegeben werden. Wenn wir ferner eine Stimmgabel vor das Rohr *R* halten, deren Ton mit dem Tone der Saite übereinstimmt, so geräth die Saite in lebhafte Mitschwingung, die wir leicht daran erkennen können, dass kleine auf die Saite gesetzte Papierreiterchen von derselben abgeworfen werden. Da dieses Experiment nun mit Stimmgabeln von verschiedener Tonhöhe gleich gut gelingt, sobald wir die Länge der Saite auf die Tonhöhe genau abstimmen, so geht daraus hervor, dass die trichterförmige Membran die Fähigkeit hat, eine grosse Reihe von Tönen gleich gut fortzuleiten. Das Trommelfell aber, welches diese Fähigkeit in einem idealen Grade besitzt, erhält sie ebenfalls zum grossen Theil durch seine trichterförmige Gestalt.

Während wir in dem beschriebenen Versuche das Trommelfell mit der gekrümmten Membran vergleichen, können wir den Stab und die Saite den Gehörknöchelchen gleichsetzen, die zur weitern Fortpflanzung des Schalles dienen. Diese spielen aber noch eine andere Rolle dadurch, dass sie die schwingende Membran als träge Masse belasten und ihr dadurch jeden Rest von Eigenschwingung nehmen, sodass sie sich allen Schwingungsgeschwindigkeiten gleich gut accommodirt. Dazu kommt noch ein anderer Vortheil, der darin besteht, dass durch die Belastung auch jede Nachschwingung der Membran aufgehoben wird. Es wäre gewiss eine sehr lästige Störung für unser Ohr, wenn das Trommelfell nachtönen würde, wie eine angeschlagene Pauke, und dieser Uebelstand wird vorzüglich dadurch beseitigt, dass die Gehörknöchelchen wie Dämpfer wirken,

ähnlich wie die Dämpfer in einem Klavier, welche sich nach jedem Tone an die Saite anlegen.

Noch einen wichtigen Effect haben wir hervorzuheben, welchen die trichterförmige Gestalt des Trommelfells ausübt. Wir haben oben erwähnt, dass die Trichterfläche desselben nach aussen hin segelartig hervorgewölbt ist. Die Folge davon wird sein, dass die Spitze des Trichters, der Nabel, nicht die grössten Schwingungen machen kann, letztere werden vielmehr zwischen dem Nabel und dem Rande liegen. Aber die Kraft dieser Schwingungen pflanzt sich von allen Seiten nach dem Nabel hin fort und sammelt sich hier gleichsam zu einer grössern Intensität. Wir können diesen Vorgang vergleichen mit einer Wellenbewegung, welche wir an einem schlaff horizontal ausgespannten Seile erzeugen. Geben wir seiner nach unten sehenden Mitte einen Stoss nach oben, so pflanzt sich eine Welle nach dem Endpunkte fort, welche dort ihre Kraft ausüben kann. Aehnlich pflanzen sich die Wellen der Membran nach dem Nabel hin fort, und indem hier ihre Kraft dazu verwendet wird, die Kette der Gehörknöchelchen in Bewegung zu setzen, nehmen die Excursionen an Höhe ab. Die Verkleinerung der Excursionen ist aber hier von grosser Wichtigkeit; denn es ist klar, dass die Membran des ovalen Fensters keine so grosse Schwingungen machen kann, als das ungefähr zwanzigmal grössere Trommelfell. Es werden also aus diesem Grunde die Schwingungen des Trommelfells in der Membran selbst, während sie sich nach der Mitte zur Spitze des Hammerstieles hin fortpflanzen, verkleinert. Zugleich wächst hierbei in dem Trommelfelltrichter die Kraft der Schallwelle, ähnlich wie ein Flüssigkeitsstrom, welcher durch einen Trichter fliesst, nach unten hin an Geschwindigkeit zunimmt.

Auf diese Weise werden durch die Gehörknöchelchen die Schallwellen von dem Trommelfell auf eine zwanzigmal kleinere Membran übertragen, es concentrirt

sich die ganze Kraft der Trommelfellschwingung auf eine viel kleinere Fläche und wird dadurch zwanzigmal stärker gemacht. Dazu kommt aber noch, dass die Kette der Gehörknöchelchen wie ein Hebel wirkt, und wenn wir uns die Länge der beiden Hebelarme ausrechnen, so finden wir, dass das Trommelfell vermöge des Hammerstiels an einem $1^1/_2$ mal längern Arme angreift als die Membran des ovalen Fensters; und daraus folgt, dass die Kraft der Schallwelle bis zum ovalen Fenster sogar dreissigmal grösser wird.

Zu den bewundernswerthen Feinheiten, welche wir in der Construction des Trommelhöhlenapparates vorfinden, gehört ferner die Wirkung zweier kleiner Muskeln, welche sich an die Gehörknöchelchen ansetzen. Der eine derselben verbindet sich durch eine dünne lange Sehne mit dem Stiele des Hammers, nahe seinem Halse (Fig. 64), sodass er senkrecht gegen das Trommelfell zieht. Es ist kein Zweifel, dass die Contraction dieses Muskels dazu dient, das Trommelfell mehr oder weniger nach innen zu ziehen und dadurch zu spannen. Es frägt sich daher, welche Function wir diesem Muskel zuschreiben sollen.

Eine stärkere oder geringere Spannung des Trommelfells muss auf seine Schwingungen offenbar einen Einfluss ausüben. Da seine Spannung überhaupt keine sehr grosse ist, so wird eine Verstärkung derselben durch den Trommelfellspanner im Stande sein, eine merkliche Veränderung hervorzurufen. Man hat daher vermuthet, dass dieser Muskel die Function habe, das Trommelfell auf Töne verschiedener Höhe zu accommodiren, sodass ähnlich wie das Auge auch das Ohr eine Art Accommodation besitze. Dieser Ansicht aber könnte man entgegenhalten, dass die Spannung des Muskels unmöglich so schnell wechseln kann, als wir im Stande sind in einer Musik eine grosse Reihe von Tönen hintereinander aufzufassen. Denn offenbar würde die Muskelcontraction z. B. bei einem Triller, den wir hören, hinter dem gehörten Tone merklich zurückbleiben und

dann gerade auf den falschen Ton fallen. Es ist also nicht wahrscheinlich, dass dieser Muskel fortwährend in Thätigkeit begriffen ist, wol aber wäre es denkbar, dass er beim aufmerksamen Hören auf einen bestimmten länger dauernden Ton in Thätigkeit gerathe. Je stärker derselbe sich zusammenzieht, und je stärker er das Trommelfell spannt, desto besser werden wir höhere Töne wahrnehmen, weniger stark die tiefen Töne, sodass auf diese Weise eine Accommodation des Ohres zu Stande kommen kann.

Man hat dem Trommelfellspanner auch die Function eines Dämpfers zugeschrieben. Wenn durch Contraction dieses Muskels das Trommelfell stark nach innen gespannt wird, so lässt sich denken, dass die Schwingungen desselben dadurch gedämpft werden, ähnlich wie eine schwingende Saite gedämpft wird, wenn wir sie mit dem Finger drücken. Es ist daher wol möglich, dass der Muskel auch in Action geräth, wenn ein starker betäubender Schall auf das Ohr einwirkt, indem er die Excursionsweite des Trommelfells vermindert. Zugleich wird dadurch der Steigbügel fester in das ovale Fenster hineingedrängt und vermag keine zu grossen Bewegungen zu machen. Die Dämpfung wird für tiefe Töne wirksamer sein als für hohe Töne, da die stärkere Spannung dem Trommelfell höhere Eigentöne gibt.

Sehr starke Erschütterungen, z. B. durch einen Kanonenschlag, sind bekanntlich im Stande, das Trommelfell zu sprengen. Gegen eine so plötzliche, heftige Einwirkung kann wol der genannte Muskel keinen Schutz bieten, da er nicht schnell genug in Contraction versetzt werden kann, wol aber ist es möglich, dass er in solchen Fällen die nicht unbeträchtlichen Nachschwingungen des Trommelfells mässigt.

Völlig unerklärt ist die Funktion des zweiten Muskels, der sich an den Steigbügel ansetzt und der Steigbügelmuskel genannt wird. Er entspringt an der hintern Wand der Paukenhöhle, und seine Sehne

setzt sich rechtwinkelig an das Köpfchen des Steigbügels an, nahe dem Gelenk mit dem Ambosfortsatze. Man hat vermuthet, dass er auch dazu bestimmt ist, die Schallschwingungen zu dämpfen, indem er die Fussplatte des Steigbügels schief gegen das ovale Fenster stellt. Wir möchten hinzufügen, dass seine dämpfende Wirkung auch darin bestehen könnte, dass er senkrecht gegen die Bewegungen des Steigbügels zieht und dadurch die Excursionen desselben verkleinert. Denn wenn wir z. B. an eine schwingende Feder einen Faden befestigen, und diesen senkrecht gegen die Ebene der Schwingungen anziehen, so werden die letztern dadurch gehemmt werden.

Höchst sonderbar ist es, dass durch die Trommelhöhle ein Nerv hindurchläuft, welchen die Anatomen die Trommelsaite (*Chorda tympani*) genannt haben, der aber mit dem Hören gar nichts zu thun hat. Er geht durch eine Knochenspalte wieder hinaus und wendet sich zur Zunge hin.

---

## Fünftes Kapitel.

Das Labyrinth. — Die Corti'schen Organe. — Die Schallleitung im Labyrinth. — Das Vorhandensein mitschwingender Apparate.

Indem wir nun zu dem Labyrinth übergehen, dringen wir in den tiefsten und geheimnissvollsten Theil des Gehörorganes ein, in welchem der physiologische Vorgang des Hörens stattfindet. Damit wir uns in den Irrgängen dieses complicirten Gebäudes zurechtfinden, wollen wir dasselbe erst von aussen betrachten. In den Fig. 70 sehen wir es nach einer Zeichnung von Helmholtz von verschiedenen Seiten dargestellt. In Fig. *A* erblicken wir das Labyrinth der

linken Seite von aussen betrachtet. Das ovale Fenster *Fv* führt in den mittlern weiten Raum, welchen man den **Vorhof** (*Vestibulum*) nennt. Zu beiden Seiten desselben liegen wundersam geschlungene Gebilde, auf

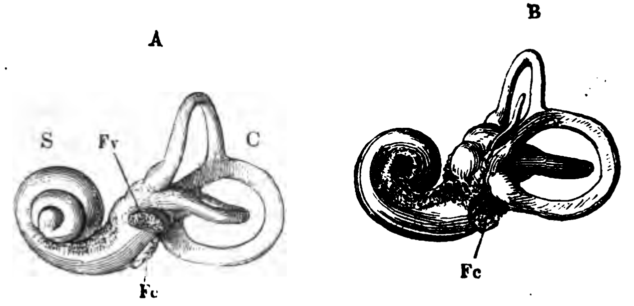



*Fig. 70 A.* *Fig. 70 B.*

der einen die **Schnecke** *S*, auf der andern die **halbcirkelförmigen Kanäle** *C*. Die Schnecke hat ganz die Gestalt eines gewöhnlichen Schneckenhauses und besteht aus zwei und einer halben Windung. Der Vorhof zeigt ferner eine zweite Oeffnung, das **runde Fenster** *Fc*, welches am Anfange des Schneckenkanals liegt. Beide Fenster, mit einer Membran überkleidet, sehen, wie wir bereits wissen, in die Paukenhöhle hinein. In dem ovalen Fenster spielt die Platte des Steigbügels, während die Membran des runden Fensters frei ist.

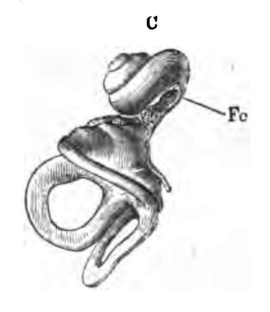



*Fig. 70 C.*

Die äussere Schale des Labyrinthes besteht aus Knochen, und das Ganze ist in der dicken Knochenmasse des Felsenbeines fest eingegraben. Die knöchernen Schneckenwände bilden im Innern einen Hohlgang,

der in Windungen bis zur Spitze führt. Derselbe wird durch eine knöcherne Scheidewand in zwei Kanäle gespalten, indem sich die Scheidewand wie eine Wendeltreppe um die Axe der Schnecke von der Basis bis zur Spitze hinzieht. Sie heisst die knöcherne Spiralwand. Dieselbe reicht aber nicht ganz bis zur äussern Wand der Schneckenwindungen, sondern wird mit dieser durch eine Membran verbunden, welche ebenfalls wegen ihrer gewundenen Gestalt die Spiralmembran heisst. Von den beiden Schneckengängen, welche durch die Spiralwand entstehen, nennt man diejenige, welche der Schneckenbasis zugekehrt ist, die Paukentreppe, weil an ihrem Anfange das runde Fenster liegt, welches zur Paukenhöhle führt. Der andere Gang, welcher der Schneckenspitze zugekehrt ist, heisst die Vorhofstreppe und sieht direct in den Vorhof hinein.



*Fig. 71.* *

In Fig. 71 sehen wir die knöcherne Schnecke der Länge nach von der Spitze zur Basis hin durchgeschnitten und erkennen daran die Querschnitte der Schneckenwindungen, und ebenso die Scheidewand, welche die Schneckenwindung in die zwei genannten Treppen theilt.

---

* Kölliker, Gewebelehre.

Das ganze knöcherne Labyrinth ist innen ausgekleidet durch eine Haut, welche sich der Knochenwandung anschliesst, und welche daher das häutige Labyrinth genannt wird. Der ganze innere Hohlraum ist überall ausgefüllt von dem Labyrinthwasser, welches zum Träger der Schallwellen bestimmt ist. Auch die Wände des Vorhofs und der halbcirkelförmigen Kanäle sind mit jener Haut ausgekleidet, welche im ganzen zwei geschlossene Säcke bildet, deren Wände sich im Vorhof berühren.

Die halbcirkelförmigen Kanäle oder Bogengänge haben eine sehr regelmässige Lage gegeneinander, indem ihre Ebenen rechte Winkel miteinander bilden. Man unterscheidet daher einen horizontalen und zwei senkrechte Bogengänge, die alle an ihrem Ursprunge eine flaschenförmige Erweiterung, die Ampulle, besitzen.

Anf den Membranen des häutigen Labyrinthes finden wir die Endausbreitungen des Hörnerven vor, welcher das knöcherne Labyrinth in grosser Ausdehnung mit seinen Fasern durchbohrt und sich in der Schnecke, dem Vorhofe und den Ampullen in feine Endigungen auflöst.

In dem Vorhofe liegen nahe der Wand sehr kleine Kryställchen, die Gehörsteinchen (Otolithen), aus kohlensaurem Kalke bestehend, welche man seit langer Zeit kennt. In neuerer Zeit sind nun von Max Schultze in der häutigen Wand, an welche die Otolithen angeheftet scheinen, Nervenenden gefunden worden. Die Wand ist mit Epithelzellen* bedeckt, welche an ihrer Oberfläche feine Härchen tragen, während sie nach der Wand zu mit den feinsten Nervenfasern in Verbindung stehen. Man kann daher annehmen, dass wenn die Otolithen in Bewegung gerathen, sie die Härchen hin- und herbeugen und dadurch die Nervenenden mechanisch reizen.

In den Ampullen (Fig. 72) bildet die häutige Wand eine verdickte hervorragende Leiste, welche man die

* Zellen, welche die Oberfläche von Häuten bekleiden.

Hörleiste *b* (*Crista acustica*) genannt hat, und die besonders bei Fischen stark ausgebildet ist. Auf dieser stehen ziemlich lange steife Härchen, die ebenfalls als Nervenendorgane zu betrachten sind, da zu der Leiste zahlreiche Nervenfasern (*N*) hereintreten und sich dort ausbreiten. Diese Hörhärchen werden wahrscheinlich durch die Wellen des Labyrinthwassers in Schwingung versetzt, und vermitteln dadurch eine Gehörsempfindung.

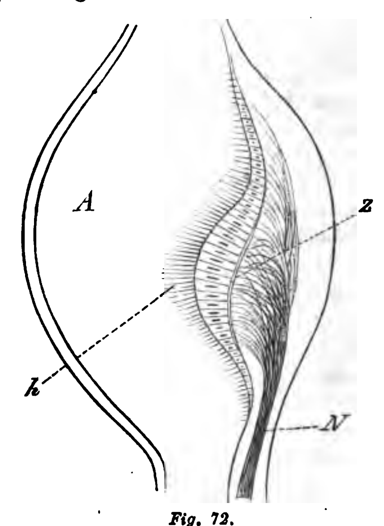



*Fig. 72.*

Noch viel merkwürdiger und complicirter sind die Nervenendorgane, welche wir in der Schnecke vorfinden. Der Schneckennerv, welcher sich vom gemeinsamen Hörnerven abzweigt, dringt in die Axe der Schnecke ein und löst sich in Fasern auf, welche spiralig nach und nach durch die knöcherne Spiralwand hindurchtreten und zur Spiralmembran hingehen.

In Fig. 73 erblicken wir einen Querschnitt durch eine Windung der Schnecke. Rechts befindet sich die

äussere Wand der Windung, links die Axe der Schnecke. Die knöcherne Spiralwand *Ls* theilt die Windung in die zwei Gänge, die Vorhofstreppe *Sv* (*Scala vestibuli*) und die Paukentreppe *St* (*Scala tympani*). An diese Wand schliesst sich die Spiralmembran *b* an, welche die beiden Treppen vollkommen voneinander abschliesst und sich an die äussere Schneckenwand ansetzt. Eine Haut *v* theilt noch die Vorhofstreppe der Länge nach in zwei Gänge. Die Nervenfasern treten nun von der Axe her in die knöcherne Spiralwand ein,

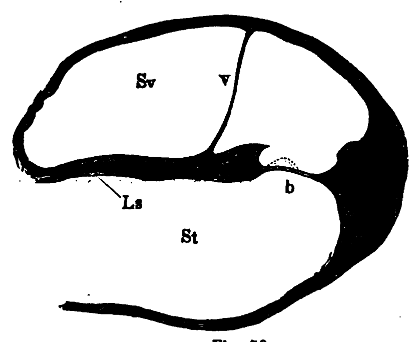



*Fig. 73.*

gehen durch diese bis zum untern Rande und verbinden sich mit der Spiralmembran. Dieselbe ist eigentlich aus mehreren Gebilden zusammengesetzt, von denen einige in der Figur punktirt angedeutet sind, und welche sich durch die ganze Schnecke spiralig in die Höhe ziehen. Hier finden wir die wunderbarsten Gebilde vor, die von Corti entdeckten und nach ihm benannten Organe.

Die Corti'schen Organe bestehen aus *S*-förmig gekrümmten Stäbchen, welche wir in Fig. 74 abgebildet sehen. Man unterscheidet zwei Stäbchen, ein inneres *i* und ein äusseres *e*, welche zusammen einen Bogen bilden. Das innere Stäbchen steigt fast unmittelbar

am Anfange der Membran in die Höhe und beginnt mit einem breitern Fusse, das äussere endet ebenso auf der Membran, welche man aus diesem Grunde die

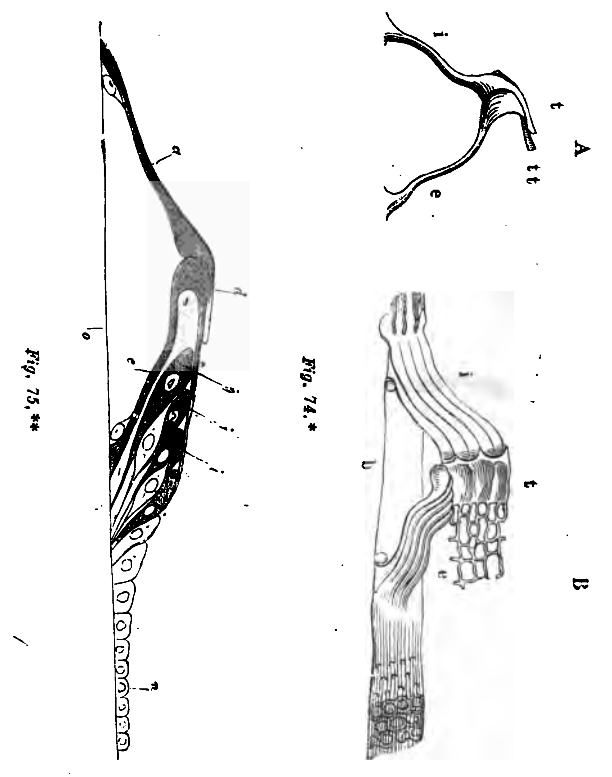


Fig. 74.*

Fig. 75.**

B a s i l a r m e m b r a n nennt. Oben sind die beiden Stäbchen eigenthümlich ineinander gefügt (*t*) und zeigen ein kurzes horizontales Stäbchen (*t t*) als Fortsetzung.

Solche Corti'schen Bögen stehen nun auf der Basilar-

---

* Nach Helmholtz. — ** Nach Kölliker.

membran dicht nebeneinander in ausserordentlich grosser Anzahl; man hat deren ungefähr 3000 gezählt, die auf einem sehr kleinen Raume aneinander gereiht sind. Fig. *B* gibt eine Anschauung davon, in welcher Weise die Bögen auf der Basilarmembran angebracht sind, welche in *b* dargestellt ist. In neuerer Zeit hat man ausserdem gefunden, dass die Membran in der Querrichtung aus geraden Fasern zusammengesetzt ist, sodass jeder Corti'sche Bogen auf einer oder ein paar solcher Fasern mit seinen Fusspunkten aufsteht und mit ihnen verschmilzt. Diese Construction scheint von Bedeutung zu sein; denn es wird daraus sehr wahrscheinlich, dass die Querfasern der Basilarmembran dazu bestimmt sind, mit den aufsitzenden Corti'schen Bögen gemeinsame Schwingungen auszuführen.

Der übrige Raum der Zwischentreppe ist hauptsächlich mit Zellen verschiedener Form ausgefüllt. Die Mehrzahl derselben sind kleine längliche, mit einem haarförmigen Fortsatz endende Zellen, welche besonders in der Nähe der Stäbchen und der Basilarmembran angehäuft sind. In Fig. 75 sehen wir diese Zellen *i i*, deren Fortsätze zur Basilarmembran gehen, und die in drei Reihen der Länge nach angeordnet sind. Der Corti'sche Bogen *a d e* ist hier ebenfalls senkrecht, auf der Basilarmembran *o* stehend, abgebildet. Die Wände derselben sind unmittelbar mit rundlichen Epithelzellen *n* ausgekleidet.

Von oben betrachtet zeigt das Corti'sche Organ und die anliegenden Gebilde noch eine besondere Structur, welche lebhaft an das Innere eines Klavierinstruments erinnert. In Fig. 76 erblicken wir in *b a c* die innere Corti'sche Faser, in *e* die äussere, in *i* ihre Fortsetzung auf der Basilarmembran. Bei *f* liegt der höchste Punkt des Bogens, wo sich das horizontale Endstäbchen befindet. An diese setzt sich der zellige Inhalt membranartig an, und zeigt einen sehr regelmässigen Bau, welchen wir in Fig. 76 unbedeckt von den abgehobenen Corti'schen Fasern sehen. Wir finden darin eine dreifache Löcherreihe *m*, *n*, *o*, und zwischen

ihnen regelmässig gelagerte Zwischenglieder, unter denen man innere *l* und äussere *l'* unterscheidet, und schliesslich quadratische Endstücke *p*, *q*.

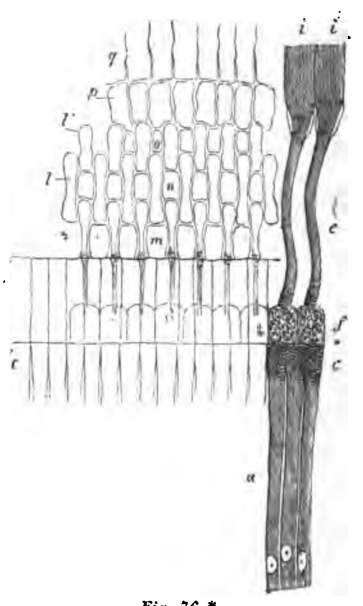


*Fig. 76.**

Das Ganze macht unstreitig den Eindruck eines mit grosser Feinheit und Regelmässigkeit gebauten Instruments, in welchem die einzelnen aneinander gefügten Theilchen mit grosser Genauigkeit abgemessen sind. In der That findet man, dass die Corti'schen Bögen nicht alle an Grösse und Form einander gleich sind, sondern dass sie von der Basis der Schnecke bis zur Spitze hin an Länge zu- und an Höhe abnehmen; d. h. an der Basis stehen die kürzern Fasern steiler

* Nach Kölliker.

in die Höhe, wie nebenstehende Fig. 77 (*b*) andeutet, während sie an der Spitze (*s*) gestreckter laufen, und daher eine geringere Höhe und grössere Spannweite besitzen. Der Uebergang zwischen diesen Endformen ist natürlich bei der grossen Zahl von Bögen ein ganz allmählicher. Da kann man sich denn unmöglich des Eindrucks erwehren, dass die grosse Zahl der verschiedenen Corti'schen Bögen dazu bestimmt sei, Töne von verschiedener Höhe unserm Gehörssinne zugänglich zu machen. Ausserdem ist die Breite der Basilarmembran nicht überall gleich, sondern sie nimmt von der Schneckenbasis zur Kuppe hin beständig zu, und zwar in höherm Grade als die Spannweite der Corti'schen Bögen wächst.

Bevor wir auf die Function des Corti'schen Organes eingehen, kehren wir nochmals zur Schallleitung zurück, welche die Schallwelle dem Labyrinthe zuführt. Wir haben letztere am ovalen Fenster verlassen, zu welchem sie durch die Schwingungen des Steigbügels hingelangt. Die Membran des ovalen Fensters führt daher Transversalschwingungen aus und setzt dadurch das Labyrinthwasser in Bewegung. Nun ist es klar, dass wenn das Labyrinthwasser hier nach innen gestossen wird, es an einer andern Stelle nach aussen weichen muss, weil eine Flüssigkeit nicht zusammendrückbar ist. Diesem Zwecke dient offenbar das runde Fenster. Sobald der Steigbügel nach innen schwingt, wölbt sich die Membran des runden Fensters nach aussen, und gestattet dadurch dem Labyrinthwasser einen Ausweg. Wäre das runde Fenster nicht vorhanden, so würde der Steigbügel nur sehr kleine Schwingungen machen können. Das runde Fenster spielt

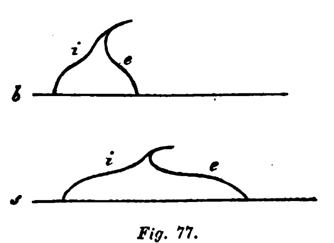


Fig. 77.

also dem ovalen gegenüber die Rolle einer Gegenöffnung.

In dem Labyrinthwasser entsteht nun durch die Stösse des Steigbügels eine Wasserwelle, welche sich in alle Theile des Labyrinthes hin fortpflanzen kann. Vom ovalen Fenster geht die entstehende Wasserwelle aus, und da dieses in den Vorhof führt, so wird die Wasserwelle sich zuerst im Vorhofe ausbreiten. Von hier aus aber gelangt sie weiter in die Schnecke hinein, und man nimmt an, dass sie hier die membranöse Scheidewand mit ihren Corti'schen Organen in Mitschwingung versetzt.

Helmholtz hat über diesen Gegenstand sehr interessante Betrachtungen angestellt. Da nämlich der Vorhof durch die zwei darinliegenden häutigen Säcke in zwei getrennte Flüssigkeitsräume getheilt ist, von denen der eine das ovale, der andere das runde Fenster besitzt, so kann das Wasser nicht unmittelbar im Vorhofe von dem ovalen Fenster nach dem runden Fenster durch den Stoss des Steigbügels hingedrängt werden; nun erstreckt sich der Flüssigkeitsraum vom ovalen Fenster aus frei in die Vorhofstreppe der Schnecke hinein, während sie vom Eingange in die Paukentreppe durch eine Membran getrennt ist. Es wird daher die Wasserwelle hauptsächlich in die Vorhofstreppe hineinlaufen und diese bis zur Spitze hinaufeilen. Auf diesem Wege erschüttert sie die nachgiebige häutige Scheidewand, welche nach der Paukentreppe hinein ausweichen muss, und so das Wasser gegen das Fenster hindrängt, welches dem Ausgange der Paukentreppe gegenüberliegt.

Wir wissen aus den physikalischen Beobachtungen über Mitschwingung, dass eine solche sehr leicht zu Stande kommt, wenn der Eigenton des mitschwingenden Körpers der Tonhöhe des Schalles genau entspricht. Körper, welche der Mitschwingung fähig sind, scheinen aber in dem Corti'schen Organe wirklich vorhanden zu sein. Die Basilarmembran, welche aus Querfasern zusammengesetzt ist, können wir nämlich

nach der Ansicht von Helmholtz betrachten wie eine Aneinanderreihung gespannter Saiten, von denen einzelne Partien, unabhängig vom Ganzen, in Mitschwingung versetzt werden. Nehmen wir ferner an, dass die auf der Basilarmembran aufstehenden Corti'schen Bögen einen Einfluss auf die Eigenschwingung der Membran haben, und dass sie durch Form und Grösse der Spannweite den Eigenton verändern, so lässt sich wohl begreifen, dass jedem Tone ein bestimmter Abschnitt der Basilarmembran in verschiedener Höhe zwischen Basis und Spitze der Schnecke entsprechen wird. Es schwingt also nach dieser Vorstellung auf einen bestimmten Ton niemals die ganze Basilarmembran mit, sondern immer nur ein bestimmter Abschnitt derselben, und dadurch wird es verständlich, dass wir im Stande sind, eine so grosse Reihe von Tönen voneinander zu unterscheiden. Es ist noch vollständig unklar, in welcher Weise die Schwingungen der Basilarmembran mit den zugehörigen Corti'schen Bögen, welche in einer weichen Zellenmasse liegen, vor sich gehen. Die innern Fasern, welche am innern Rande der Basilarmembran entspringen, werden von hier aus wenig bewegt werden, während die äussern Fasern, deren Fusspunkt ungefähr auf der Mitte der Membran aufsteht, am stärksten erschüttert werden können. Welche Rolle sie aber hierbei spielen, wissen wir nicht; man hat ihnen sogar in letzterer Zeit eine geringere Bedeutung zugeschrieben als früher, seitdem man weiss, dass die Schnecke der Vögel gar keine Corti'schen Bögen enthält, und hat mehr Gewicht auf die Mitschwingung der Basilarmembran gelegt.

Im übrigen aber steht es fest, dass wir es hier in der Schnecke mit einer Reihe mitschwingender Apparate zu thun haben, welche mit wunderbarer Genauigkeit abgestimmt sind. Wir haben hier einen musikalischen Apparat vor uns, nicht dazu bestimmt, Töne zu erzeugen, sondern sie zu percipiren, aber ähnlich in seiner Construction den künstlichen Toninstrumenten,

und wiederum diese sowol in Feinheit als Einfachheit der Ausführung bei weitem übertreffend. Denn während in einem Klavier jede Saite ein eigenes Hämmerchen haben muss, durch dessen Stoss sie ertönt, besitzt das Ohr nur ein einziges Hämmerchen von kunstvoller Form in seinen Gehörknöchelchen, welches im Stande ist, gleichsam alle Saiten des Corti'schen Organes gesondert erklingen zu lassen.

Die Basilarmembran besitzt, wie wir schon erwähnt haben, keine gleichmässige Breite, sondern nimmt nach oben hin an Breite zu. Wenn wir uns dieselbe aus ihrer spiraligen Form auf eine gerade Ebene abgerollt denken, so erhält sie eine keilförmige Gestalt, wie nebenstehende Fig. 78 zeigt, in welcher ihre Querfasern durch Linien dargestellt sind. Denken wir uns auf den Querfasern die Corti'schen Bögen aufstehend, deren Spannweite von $a$ bis $a'$ wächst, so wird der erstere Abschnitt der Basilarmembran $b\ d$ bis $b'\ d'$ ebenfalls an Breite wachsen. Hierbei erscheint es sonderbar, dass die Spitze der Schnecke den breitern, die Basis den schmälern Theil der Basilarmembran enthält, während man nach dem Baue einer Schnecke das Umgekehrte für praktischer halten sollte. Aber alle einzelnen Theile dieses Organes sind mit einer solchen Exactheit ineinander gefügt, dass die beobachtete Lagerung der Membran gewiss nicht ohne Bedeutung ist.

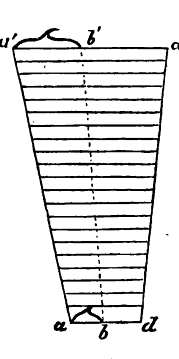


Fig. 78.

Aus der verschiedenen Breite der Membran und der verschiedenen Form der Bögen hat man mit grosser Wahrscheinlichkeit den Schluss gezogen, dass an der Basis der Schnecke die hohen, an der Spitze die tiefen Töne wahrgenommen werden; denn hier werden die längern Querfasern durch tiefere, dort die kürzern

Fasern durch höhere Töne in Mitschwingung versetzt werden. Man könnte dagegen den Einwand erheben, dass die Querfasern überhaupt nicht auf tiefe Töne mitklingen können, weil sie alle so ausserordentlich kurz sind. Freilich beträgt dio Breite der Membran an der Spitze der Schnecke nur einen halben Millimeter und an der Basis kaum einen zwanzigstel Millimeter *, und wenn wir uns Violinsaiten von dieser Kürze vorstellten, so müssten sie schon bei mässiger Spannung sehr hohe Töne geben; aber wir müssen in Betracht ziehen, dass die Querfasern nicht frei ausgespannte Saiten sind, sondern dass sie durch die umgebenden Theile belastet werden, und dass namentlich die mit ihnen verbundenen Corti'schen Bögen durch ihre Spannung den Schwingungen einen Widerstand entgegensetzen. Eine jede solche Belastung und Hemmung stimmt aber den Eigenton einer gespannten Saite herab, und daraus wird es erklärlich, dass die breitern Abschnitte der Basilarmembran selbst tiefe Eigentöne besitzen können.

Belastet ist die Basilarmembran nicht nur durch die Corti'schen Bögen, sondern auch durch die ganze Masse der den Bögen und der Membran anliegenden Zellen und hauptsächlich durch das Labyrinthwasser. Letzteres setzt durch Reibung und Druck den Schwingungen einen Widerstand entgegen, und so kommt es, dass bestimmte Fasern der Membran trotz ihrer Kürze in derselben Periode schwingen können, in welcher die Wasserwelle des Labyrinthes selbst schwingt.

Aus allen diesen Betrachtungen gewinnen wir die feste Ueberzeugung, dass die Schnecke zur Wahrnehmung der musikalischen Töne bestimmt ist. Dieses Organ befähigt uns, nicht nur Tonhöhen zu unterscheiden, sondern auch Töne schnell hintereinander aufzufassen, wie sie sich zu einer Melodie aneinander reihen, und schliesslich sind wir sogar im Stande, mit

* Nach den Messungen von Hensen am Gehörorgane des Neugeborenen.

Hülfe dieses Organes den Zusammenklang einer grossen Menge von Tönen in uns aufzunehmen, um uns an ihrer Harmonie zu erfreuen.

Man hat berechnet, in welchem Verhältnisse die Zahl der Corti'schen Bögen zu der Fähigkeit steht, Tonunterschiede wahrzunehmen. Da wir 3000 Corti'sche Bögen besitzen, so können wir nach einer Schätzung von Helmholtz ungefähr 2800 auf die sieben Octaven vertheilen, in denen die gebräuchlichen musikalischen Töne enthalten sind. Es kommen folglich auf eine Octave ungefähr 400 Corti'sche Bögen, und auf einen halben Ton 33 $^1/_3$ Bögen. Es entsprechen also dem Intervall eines halben Tones eine ziemliche Anzahl von Querfasern und Bögen, von denen die mittlern am stärksten und die nach beiden Seiten hin mit abnehmender Stärke erschüttert werden. Nun können aber geübte Musiker noch viel feinere Unterschiede zweier Töne wahrnehmen, ja sogar nach der Angabe von E. H. Weber bis zu $^1/_{64}$ Ton. Auf zwei solche Töne werden dann gerade zwei benachbarte Corti'sche Bögen kommen, und daher dürfte dieser Unterschied schon auf der Grenze der Wahrnehmbarkeit liegen. Kurzum wir sehen, wie reich die Schnecke an mitschwingenden Apparaten zur Wahrnehmung musikalischer Empfindungen ausgestattet ist.

Auf welche Weise steht nun der Hörnerv mit den Corti'schen Organen in Verbindung? — Diese Frage hat in neuerer Zeit die mikroskopische Anatomie lebhaft beschäftigt. Man wusste schon seit geraumer Zeit, dass der Hörnerv in die Axe der Schnecke eindringt, und dass er von hier aus seine Fasern nach und nach durch die knöcherne Spiralwand nach aussen sendet. In dieser hat man die Fasern bis zum Rande hin verfolgt, wo sich die Basilarmembran ansetzt, aber von dieser Grenze entziehen sich die Fasern der sichern Beobachtung und legen ihrer weitern Verfolgung grosse Schwierigkeiten in den Weg. Nach den neuern, sehr sorgfältigen Beobachtungen einiger Untersucher ist es sehr wahrscheinlich geworden, dass die Nervenfasern

mit den sogenannten Haarzellen, von denen oben die Rede war, in Verbindung stehen. Wenigstens findet man diese Zellen in der Schnecke der Vögel, in welcher die Corti'schen Bögen fehlen, in grosser Anzahl vor, und hier ist das Herantreten von feinen Nervenfasern in diese Zellen mit einiger Sicherheit beobachtet worden.

Höchst wahrscheinlich werden nun die Enden der Nervenfasern durch die mitschwingenden Apparate in der Schnecke auf mechanischem Wege gereizt, indem durch die Schwingung dieser Organe die Nerven gezerrt oder gequetscht werden. Eine jede solche Reizung eines gewöhnlichen Hautnerven würde Schmerz erzeugen, durch Reizung des Hörnerven aber wird die ihm eigene specifische Empfindung, die Gehörsempfindung hervorgerufen, welche erst zu Stande kommt, nachdem der Nerv seine Erregung dem Gehirn mitgetheilt hat. Wir können annehmen, dass jedes Corti'sche Organ mindestens eine Nervenfaser erhält, sodass dem Gehirne Töne verschiedener Höhe durch verschiedene Nervenfasern zur Kenntniss gelangen, und das ist offenbar der Grund, weshalb wir so feine Tonhöhenunterschiede wahrzunehmen vermögen. Wir müssen uns ferner noch die Frage vorlegen, was die Gehörsteinchen und die Hörhärchen in dem Vorhofe und in den Ampullen zu bedeuten haben. Wir haben es hier offenbar nicht mit verschiedenartig abgestimmten Apparaten zu thun, welche zur Tonempfindung dienen könnten. Es ist daher sehr wahrscheinlich, dass diese Organe nur zur Wahrnehmung von Geräuschen bestimmt sind, indem sie durch unregelmässige unperiodische Bewegungen des Labyrinthwassers einen Anstoss erhalten, wodurch sie die freiliegenden Nervenenden reizen. In den Ampullen strömt die Flüssigkeit durch enge Oeffnungen ein und aus, und nach der Meinung von Helmholtz entstehen hier wahrscheinlich Wirbelströme, welche die Hörhärchen in Vibration versetzen. Es ist aber nicht anzunehmen, dass wir mit

Hülfe dieser Organe einen bestimmten Ton zu erkennen vermögen, weil sie nicht auf verschiedene Töne abgestimmt erscheinen, jedenfalls würde eine Unterscheidung der Töne damit höchst unvollkommen sein. Dagegen ist es leicht denkbar, dass ein Geräusch oder ein Knall diese Organe ausreichend erschüttert, um die dort befindlichen Enden des Hörnerven zu reizen.

Den mitschwingenden Apparaten im Labyrinth und vorzüglich in der Schnecke kommt noch die wichtige Eigenschaft zu, dass sie nicht merklich nachtönen, eine Eigenschaft, die wir schon am Trommelfelle und den Gehörknöchelchen hervorgehoben haben. Doch an letztern würde sie von keinem Nutzen sein, wenn die Corti'schen Organe sie nicht auch besässen. Würden dieselben nachtönen, so wäre es nicht möglich, einen Triller gut wahrzunehmen, welcher ungefähr aus acht bis zehn Tönen in der Secunde bestehen kann. Nach einer Achtel- bis Zehntelsecunde ist also der Ton im Ohre so weit ausgeklungen, dass der folgende Ton sich mit ihm nicht vermischt. Im Klaviere kann diese Eigenschaft bekanntlich nur durch eine besondere Vorrichtung erreicht werden, indem sich nach jedem Anschlage ein Dämpfer an die Seite anlegt. Die mitschwingenden Theile im Ohre aber bedürfen eines solchen Dämpfers nicht, sie besitzen an sich, vermöge ihrer Combination, die wir noch nicht genau genug kennen, die Eigenschaft, sehr schnell wieder in Ruhe zu kommen, sobald die bewegende Ursache zu wirken aufgehört hat.

Helmholtz hat indess nachgewiesen, dass ein Nachtönen im Ohre für tiefe Töne merkbar ist. Es ist nämlich sehr auffallend, was den Klavierspielern bekannt ist, dass in den sehr tiefen Tönen, namentlich von *A* abwärts, der Triller immer unvollkommener klingt, indem die Töne anfangen sich zu vermischen. Man könnte nun meinen, dass dies an der unvollkommenen Dämpfung des Instrumentes liegt und nicht an unserm Ohre. Aber auch an andern Instrumenten, z. B. am Violoncell, bei welchem die Dämpfung durch den

trillernden Finger momentan erzeugt wird, und ebenso an der Physharmonica, in welcher der Ton nach aufgehobenem Finger auch sofort verschwindet, hat Helmholtz dieselbe Erscheinung wahrgenommen. Daraus erkennen wir also, dass die Dämpfung für tiefe Töne im Ohre keine so vollkommene ist, wie für mittlere und hohe Töne.

Es liegt ferner, wie Helmholtz hervorhebt, in dieser Beobachtung ein Beweis dafür vor, dass in der That im Ohre mitschwingende Apparate existiren, welche auf verschiedene Tonhöhen abgestimmt sind. Denn wenn im Labyrinth nur ein einziger mitschwingender Theil vorhanden wäre, welcher auf alle Töne reagirte, ähnlich wie das Trommelfell und die Gehörknöchelchen es thun, so würde sich das Nachtönen in ganz anderer Weise bemerkbar machen. Es würde dann dieser Apparat einen Eigenton besitzen, und sobald die erregende Tonwelle aufhörte zu wirken, würde derselbe nicht in dem Tone dieser, sondern nach einem physikalisch nachweisbaren Gesetze in seinem Eigentone nachklingen. Denn wenn wir z. B. eine elastische Feder in einem Tempo bewegen, welches nicht ihrer Eigenschwingung entspricht, so wird sie, sobald wir sie loslassen, sofort in letztere übergehen. Wäre dies im Ohr der Fall, so würden sich die beiden tiefern Töne des Trillers nicht miteinander vermischen, sondern es würde sich beiden ein dritter Ton, ein Eigenton des Ohres, hinzugesellen. Da dies aber durchaus nicht der Fall ist, ein Eigenton des Ohres mit Ausnahme desjenigen des Gehörganges, überhaupt nicht wahrnehmbar ist, so kann die Nachschwingung tiefer Töne nur durch besondere genau abgestimmte Organe erzeugt werden, deren Existenz sich hierdurch auf das Deutlichste verräth.

Endlich sind von Hensen interessante Beobachtungen an den Gehörorganen von kleinen Krebsen gemacht worden, welche das Mitschwingen bestimmter Organe demonstriren. Diese Thiere besitzen Säckchen, welche Gehörsteinchen enthalten und innen mit Hörhärchen

besetzt sind. Ausserdem finden sich an der Körperoberfläche, an den Antennen, wie am Schwanz, hervorragende Hörhärchen, welche der directen Beobachtung mit dem Mikroskop zugänglich sind. Es wurde nun einem kleinen Wasserbehälter, in welchem sich diese Thiere befanden, der Ton eines Klapphorns zugeleitet, und Hensen konnte dabei das Mitschwingen gewisser Härchen unter dem Mikroskop genau beobachten, und fand, dass die Härchen auf verschieden hohe Töne abgestimmt waren. Daraus wird es denn fast zur Gewissheit, dass im menschlichen Ohre die mitschwingenden Apparate sich ähnlich verhalten, nur muss man bedenken, dass in letzterm die Verhältnisse viel complicirter sind, dass aber auch die Tonempfindung gewiss eine viel feinere und vollkommenere ist, als bei jenen Krustenthieren.

---

## Sechstes Kapitel.

Die Tonempfindungen. — Das Monochord. — Die Octave und ihre Eintheilung. — Wahrnehmung sehr tiefer und sehr hoher Töne. — Die Erregung des Gehörnerven.

Ein Ton entsteht, sobald ein elastischer Körper regelmässige periodische Schwingungen mit gewisser Geschwindigkeit ausführt, welche durch Schallleitung unserm Ohre zugeführt werden. An dieser Empfindung unterscheiden wir gewisse Eigenschaften, und zwar erstens die Stärke desselben oder seine Intensität, zweitens die Höhe des Tones und drittens den Klang oder die Klangfarbe (Timbre).

Die Stärke eines Tones hängt einzig und allein von der Elongation oder Amplitude der Schallwelle ab. Wenn wir uns die Schallwelle unter dem Bilde einer

Wasserwelle an der Oberfläche des Wassers vorstellen, so bedeutet hier die Elongation die Höhe dieser Wellen, welche mit ihrer Höhe an Kraft, an mechanischer Wirkung zunehmen müssen. Betrachten wir die Schwingung einer gespannten Saite, so wächst die Tonstärke mit der Grösse ihrer Elongation, während die Zahl der Schwingungen in der Secunde dabei dieselbe bleibt, und je weiter wir daher die Saite aus ihrer Gleichgewichtslage bringen, desto stärker wird ihr Ton, ohne dass sich die Tonhöhe ändert.

Es gehorchen sonach die elastischen Schwingungen demselben Gesetze wie die Pendelschwingungen. Ein Pendel von bestimmter Länge macht in der Secunde immer gleichviel Schwingungen, gleichgültig ob dieselben innerhalb gewisser Grenzen gross oder klein sind. Im ersten Fall werden seine Geschwindigkeiten grösser sein als im letztern, und ebenso verhält sich eine schwingende Saite.

Die Schallschwingungen der Luft sind longitudinale; sie bestehen aus Verdünnungen und Verdichtungen, und je stärker diese sind, desto stärker ist der dadurch entstehende Schall oder Ton. Die Lufttheilchen machen dabei hin- und hergehende Bewegungen und je grösser ihre Elongationen sind, desto mehr werden sie sich gegenseitig nähern und wieder voneinander entfernen, d. h. um so stärker wird die Verdichtung und Verdünnung sein, welche sie hervorrufen. Die Schallwelle selbst aber wird in der Luft immer dieselbe Länge beibehalten, die ihr durch die Tonquelle gegeben wird. Bei der Fortpflanzung in der Luft nimmt die Intensität des Tones mit dem Quadrate der Entfernung ab, ähnlich wie dies beim Lichte der Fall ist, und zwar desshalb, weil sich die Kraft der Schwingungen von der Entfernung 1 bis zur Entfernung 2 auf eine viermal grössere Kugelfläche überträgt. In jedem Punkte der letztern wird daher die Intensität nicht $1/2$, sondern $(1/2)^2 = 1/4$ sein müssen.

Die Höhe eines Tones hängt von der Länge seiner Schallwellen ab. Je länger die Schallwelle ist, desto tiefer, je kürzer, desto höher ist der Ton.

Stellen wir uns zunächst eine schwingende Saite vor, so repräsentirt die Länge der Saite auch zugleich die Länge der Schallschwingung in ihr. Eine Saite von der Länge eins macht also Schwingungen, welche halb so lang sind als die einer Saite von der Länge zwei. Zugleich wissen wir aber auch, dass die erstere doppelt soviel Schwingungen in der Secunde ausführt, als die letztere und wir nehmen dabei zwei Töne verschiedener Höhe wahr, von denen der eine die höhere Octave des andern genannt wird. Wir können daher auch sagen, dass die Höhe des Tones mit der Anzahl der Schwingungen in der Zeiteinheit wächst.

Betrachten wir ferner die Schallwellen verschiedener Töne in der Luft, so können wir uns vorstellen, dass bis zu einer gewissen Entfernung von der Tonquelle eine bestimmte Anzahl von Schallwellen eines Tones liegen, die wir $n$ nennen wollen. Wenn wir nun die Octave dieses Tones erklingen lassen, so werden in derselben Zeiteinheit doppelt soviel Wellen entstehen, also $2n$. Nun pflanzen sich aber alle Schallwellen, ob klein oder gross, annähernd mit derselben Geschwindigkeit fort; es werden daher $2n$ Wellen die angenommene Entfernung in derselben Zeit zurücklegen als $n$ Wellen, d. h. es werden sich innerhalb dieser Strecke nun $2n$ Wellen befinden und jede der letztern kann nur halb solang sein als die Welle des Tones von $n$ Schwingungen.

Wenn wir also zwei Töne von dem Intervall einer Octave hören, so führt der höhere Ton dem Trommelfell in der Secunde doppelt soviel aber nur halb solange Schallwellen zu als der tiefere Ton; und das Trommelfell und alle mitschwingenden Apparate im Ohr wiederholen diese Schwingungen in derselben Periode. Es ist höchst merkwürdig, dass unser Gehörorgan ein unmittelbares natürliches Gefühl für das Intervall einer

Octave besitzt. Zwei Töne von diesem Schwingungsverhältniss 1 : 2, machen auf unser Gehör einen Eindruck von grosser Aehnlichkeit miteinander, und das kommt offenbar daher, dass ihre Schwingungen in einem so einfachen Zahlenverhältniss zueinander stehen. Trotzdem erfahren wir durch unser Ohr nichts von dem Vorhandensein der Schwingungen überhaupt, und noch viel weniger von der absoluten Zahl der Schwingungen in einer bestimmten Zeit, worüber uns erst die physikalische Untersuchung aufgeklärt hat. Aber ausserordentlich fein ist unser Gehör in der Unterscheidung der Tonhöhen, d. h. der Schwingungsverhältnisse, wobei wir auch nicht Schwingungsverhältnisse als solche, sondern specifische Tonempfindungen wahrnehmen; denn erst die Physik hat uns gelehrt, diese Tonempfindungen in Schwingungsverhältnisse zu übersetzen.

Der grosse Philosoph und Mathematiker Pythagoras, welcher 500 Jahr v. Chr. in Unteritalien lebte und der durch seinen berühmten Lehrsatz den Grundpfeiler der mathematischen Wissenschaft gelegt hat, war es, welcher auch das Gesetz der schwingenden Saiten entdeckt hat. Er construirte das Monochord, welches wir in der Fig. 79 in der Form abgebildet sehen, wie es jetzt von den Physikern benutzt wird. Man erzählt, dass Pythagoras beim Anblick einer Schmiede durch den verschieden hohen Klang grosser und kleiner Hämmer auf jenes Gesetz gekommen sei.

Das Monochord besteht aus einem Holzkasten, auf welchem Saiten ausgespannt werden können. Durch die beiden Stege *a* und *b* wird die schwingende Länge der Saite begrenzt. Die Saiten werden entweder durch einen Wirbel gespannt oder man gibt ihnen durch Gewichte verschiedene Spannungen, indem man die Saite vom Stege (*a*) über eine Rolle leitet und nun durch einen Haken Gewichte (*p*) daran hängt. Mit Hülfe der letztern Methode ist man im Stande die Stärke der Spannung durch die Gewichte genau zu messen

und die Abhängigkeit der Tonhöhe von der Spannung der Saite zu ermitteln.

Wenn wir nun eine gleichmässig gespannte Saite an-

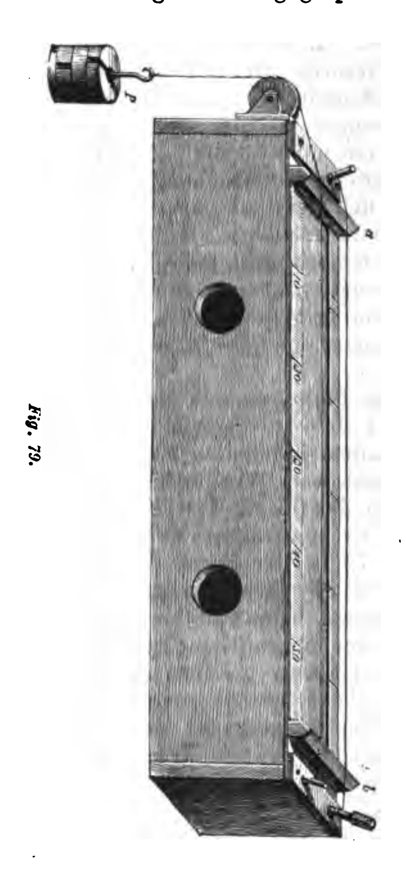


Fig. 79.

schlagen oder mit dem Bogen anstreichen, so nehmen wir einen Ton von gleichbleibender Höhe wahr, welcher aus $n$ Schwingungen bestehen möge. Ist die Saite,

wie in Fig. 79, 60 Theilstriche lang, und schieben wir nun den Steg *a* auf den Strich 30, so wird uns die halbe Saite einen Ton geben, welcher die höhere Octave des vorigen ist. Nehmen wir $1/4$ der Saite, so erhalten wir die zweite Octave, $1/8$ die dritte, $1/16$ die vierte Octave u. s. w. So bemerken wir denn, dass die Tonempfindung in unserm Ohr und das Längenmass der Saite in einer sehr merkwürdigen mathematischen Beziehung zueinander stehen, welche durch das einfachste Zahlenverhältniss von $1 : 1/2 : 1/4 : 1/8 : 1/16$ u. s. w. ausgedrückt ist.

Die Messung durch unser Gehör ist eine sehr genaue und schon kleine Abweichungen von der Octave werden als Verstimmung empfunden. Mit Hülfe des Gehörs können wir die Hälfte der Saite viel sicherer abmessen als durch das Auge, denn wenn wir es versuchen nach dem Augenmass die Hälfte zu greifen, so werden wir meist einen falschen Ton vorfinden. Der Violinspieler, welcher durch Greifen die Längen der Saiten und so ihre Tonhöhen ändert, bedient sich desshalb niemals hierzu des Augenmasses, sondern des Tast- und Muskelgefühls, welche ihn vermöge der Uebung viel sicherer leiten als das Auge. Im gewöhnlichen Leben sagt man daher: „Die Uebung liegt in den Fingern“.

Dass das Gefühl für die Octave uns unmittelbar gegeben und ohne Erlernung angeboren ist, kann keinem Zweifel unterliegen. Denn wenn wir einem Kinde, welches noch nichts von einer Tonleiter weiss, aber musikalisches Gehör hat, eine Melodie in einer tiefen Tonlage vorsingen, so wird es seiner Stimmlage gemäss diese Melodie in einer höheren Octave nachsingen. Ferner bemerkt man häufig, dass der ungeschulte Sänger beim Singen einer Melodie je nach Bequemlichkeit aus einer Octave in die andere springt.

Zwei Töne, welche um das Intervall einer oder mehrerer Octaven voneinander entfernt liegen, erscheinen uns also in ihrer Qualität unter allen übrigen Tönen am meisten einander ähnlich. Nun hat die Physik nach-

gewiesen, dass entsprechend den Längenverhältnissen schwingender Saiten die Zahl der Schwingungen sich gesetzmässig ändert. Wenn eine Saite von der Länge 1 in der Secunde $n$ Schwingungen macht, so macht eine Saite von der Länge $^1/_2$ in derselben Zeit $2\,n$ Schwingungen, und daraus erkennen wir, dass die Octave dadurch erzeugt wird, dass die doppelte Anzahl von Schwingungen unserm Ohr zugeleitet wird. Das einfache Schwingungsverhältniss von 1 : 2 ist die Ursache, dass unser Ohr zwei einander sehr ähnliche Tonempfindungen wahrnimmt, und wir müssen desshalb annehmen, dass in unserm Ohr vermöge seines innern Baues eine prästabilirte Harmonie existirt, durch welche es befähigt wird, diese Aehnlichkeit herauszufinden.

Hiermit ist aber die Frage, um die es sich hier handelt, noch nicht erschöpfend erledigt, vielmehr ist das Räthsel, welches Pythagoras vor 2500 Jahren der denkenden Menschheit aufgab, erst durch die Forschungen von Helmholtz gründlich gelöst worden. Die prästabilirte Harmonie zwischen dem Bau unseres Ohres und den Schwingungsverhältnissen der Töne beruht auf nichts anderm als auf dem Vorhandensein mitschwingender Organe im Ohre, deren Schwingungen nach denselben Gesetzen vor sich gehen wie die aller elastischen Körper. Wenn wir also zwei Töne von dem Intervall einer Octave hören, so schwingen im Labyrinth zwei Organe (Corti'sche Organe), deren Schwingungszahlen mit denen der Töne übereinstimmen, und sich auch wie 1 : 2 verhalten.

Zwei solche Töne kommen uns desshalb so ausserordentlich ähnlich vor, weil der zweite in dem ersten schon unmittelbar enthalten ist und ausserordentlich leicht aus ihm entstehen kann. Betrachten wir eine schwingende Saite, so kann man dieselbe während ihrer Schwingung ausserordentlich leicht in zwei gleiche Theile theilen, von denen jeder dann für sich schwingt und wegen der halben Länge die doppelte Zahl von

Schwingungen macht. Wir werden später bei der Entstehung der Obertöne von dieser Theilung schwingender Körper noch ausführlicher sprechen, hier sei nur bemerkt, dass man die so entstehende Octave den ersten Oberton, oder Theilton (Partialton) des gegebenen Grundtons nennt. Fig. 80 gibt ein Bild von der Art wie eine schwingende Saite sich in zwei (*b*) und drei Theile (*c*) theilen kann, von denen jeder seine eigne Schwingung ausführt. Kurzum, wenn wir davon ausgehen, dass jeder Ton physikalisch schon seine Octave in sich enthält, so ist es klar, dass beim Hören eines Tones schon die Octave mehr oder weniger stark mitklingt, und dass also im Labyrinth auch das mit-

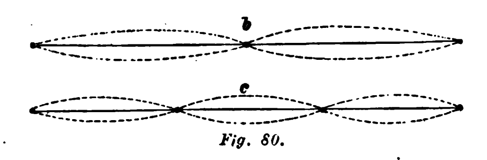


*Fig. 80.*

schwingende Organ für diese Octave leise mitschwingen wird. Dieser Anklang aber ist es, durch welchen offenbar die Aehnlichkeit zweier Töne vom Intervall einer Octave entsteht.

Die Eintheilung der ganzen hörbaren Tonreihe in Octaven ist also eine durchaus von der Natur gebotene und physikalisch sowie physiologisch begründete. Die gegebene Ableitung hierfür wird uns noch klarer werden, wenn wir das Wesen der Consonanz und Dissonanz betrachtet haben werden. Für jetzt führe ich nur an, dass die Octave die vollkommenste Consonanz ist, und dass dies auch darauf beruht, dass ihre Schwingungszahlen sich wie 1 : 2 verhalten. Man kann daher auch sagen, die Octave ist das Intervall der vollkommensten Consonanz.

Die Musik hat nun die Reihe der Töne innerhalb einer Octave in sieben Intervalle eingetheilt, woraus die Bezeichnung Octave erst hergeleitet worden ist;

da diese immer durch den achten Ton gebildet wird. Die deutschen Bezeichnungen hierfür sind: C, D, E, F, G, A, H, C. In dieser Tonleiter ist das Intervall zwischen E und F und zwischen H und C im Verhältniss ungefähr halb so gross als zwischen den übrigen Tönen. Die Intervalle zwischen den letztern heissen daher ganze Töne, die zwischen E F und H C halbe Töne.

Die Physik hat die Schwingungsverhältnisse der Tonleiter nach früher auseinander gesetzten Methoden, mit Hülfe der Sirenen und andern Instrumenten, genau ermittelt. Es verhalten sich hiernach die Schwingungszahlen von

$$C : D : E : F : G : A : H : C'$$
$$\text{wie } 1 : {}^9/_8 : {}^5/_4 : {}^4/_3 : {}^3/_2 : {}^5/_3 : {}^{15}/_8 : 2$$
$$\text{oder wie } 8 : 9 : 10 : 10^2/_3 : 12 : 13^1/_3 : 15 : 16$$

d. h. während der Ton C eine Schwingung macht, macht D $^9/_8$, E $^5/_4$, F $^4/_3$, G $^3/_2$, A $^5/_3$, H $^{15}/_8$ und C′ 2 Schwingungen, oder während C 8 Schwingungen macht, macht D 9, E 10, F $10^2/_3$, G 12, A $13^1/_3$, H 15 und C′ 16 Schwingungen. Wir erkennen hieraus, dass das Schwingungsverhältniss von $F : E = 10^2/_3 : 10$ ein kleineres ist als von $E : D = 10 : 9$, und dass ebenso das Verhältniss von $C' : H = 16 : 15$ ein kleineres ist als das der übrigen ganzen Töne (z. B. $H : A = 15 : 13^1/_3$). Man nennt ferner das Intervall zwischen dem ersten und dritten Ton, also z. B. zwischen C und E eine Terz, das zwischen vier Tönen von C bis F eine Quarte, das zwischen fünf Tönen von C bis G eine Quinte u. s. w. bis zur Octave C bis C′. Sehr leicht gelingt es, mit Hülfe einer mehrstimmigen Sirene von den angegebenen Schwingungsverhältnissen sich zu überzeugen. Die mehrstimmige Sirene, welche wir in ihrer einfachsten Form in Fig. 58 und Fig. 81 abgebildet haben, besitzt vier Löcherreihen, welche von innen nach aussen gerechnet 12, 16, 18, 24 Löcher enthalten. Diese Zahlen verhalten sich wie die Schwingungszahlen von c : e : g : c′, nämlich wie $1 : {}^4/_3 : {}^3/_2 : 2$. Wenn wir nun

die Löcherreihen hintereinander bei gleichbleibender Geschwindigkeit der Scheibe anblasen, so erhalten wir die uns bekannte Aufeinanderfolge der genannten Töne. Die Löcherreihen können natürlich auch 8, 10, 12, 16 Löcher haben, um denselben Effect zu erzielen. Auch die in Fig. 59 abgebildete Sirene hat man in eine mehrstimmige verwandelt, dadurch dass man ihr mehrere Löcherreihen gab, welche man durch Klappen öffnen und schliessen kann.

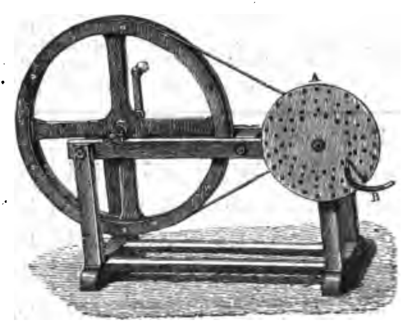


*Fig. 81.*

Ein anderer Apparat, welcher dieselben Verhältnisse deutlich macht, ist das Savart'sche Rad. Dasselbe besteht aus einem oder mehrern Zahnrädern, welche in schnelle Rotation versetzt werden. Hält man nun gegen diese Zähne ein Kartenblatt so entsteht bei genügender Geschwindigkeit ein Ton, dessen Höhe von der Anzahl der Stösse abhängt, welche die Zähne verursachen. Wenn sich nun auf derselben Axe mehrere Zahnräder befinden, auf denen sich die Zahl der Zähne wie 8 : 10 : 12 : 16 verhalten, so hören wir ebenfalls die unserm Ohre bekannte Tonfolge c e g c'. Mit Hülfe der Sirene und des Savart'schen Rades kann man die absolute Schwingungszahl der in der Musik gebräuchlichen Töne ermitteln, indem man die Anzahl der Umdrehungen in einer Secunde durch Zählerwerke beobachtet oder direct berechnet.

In der Musik sind im ganzen sieben Octaven gebräuchlich, von denen man die tiefste mit $C_{,}$ (Contraoctave), die folgenden mit C, c, c′, c″, c‴, c⁗ bezeichnet. Man ist in Deutschland übereingekommen, die Schwingungszahl für den Ton a′ auf 440 Schwingungen in der Secunde festzusetzen. Danach berechnen sich die Schwingungszahlen nach einer von Helmholtz gegebenen Tabelle folgendermassen:

| Noten. | Contra-Octave. $C_{,}$—$H_{,}$ | Grosse Octave. C—H | Ungestrich. Octave. c—h | Eingestrich. Octave. c′—h′ | Zweigestrich. Octave. c″—h″ | Dreigestrich. Octave. c‴—h‴ | Viergestrich. Octave. c⁗—h⁗ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C | 33 | 66 | 132 | 264 | 528 | 1056 | 2112 |
| D | 37,125 | 74,25 | 148,5 | 297 | 594 | 1188 | 2376 |
| E | 41,25 | 82,5 | 165 | 330 | 660 | 1320 | 2640 |
| F | 44 | 88 | 176 | 352 | 704 | 1408 | 2816 |
| G | 49,5 | 99 | 198 | 396 | 792 | 1584 | 3168 |
| A | 55 | 110 | 220 | 440 | 880 | 1760 | 3520 |
| H | 61,875 | 123,75 | 247,5 | 495 | 990 | 1980 | 3960 |

In dieser Tabelle bemerken wir, dass die Zahlen innerhalb einer Octave sich immer in den angegebenen Verhältnissen halten, und dass die entsprechenden Zahlen der folgenden Octave immer Verdoppelungen der vorhergehenden sind.

Unsere Klaviere beginnen gewöhnlich mit dem $C_{,}$ von 33 Schwingungen, oder mit dem noch tiefern $A_{,,}$ = 27,5 Schwingungen und reichen bis zum a⁗ = 3520 Schwingungen.

Von grossem Interesse ist es nun, zu ermitteln, welches die kleinste Schwingungszahl ist, die eine Tonempfindung zu erzeugen im Stande ist. Ein solcher Versuch ist bereits von Savart mit folgender Vorrichtung ausgeführt worden. Ein grosses Rad wird durch eine Kurbel gedreht und versetzt ein kleines

Rad *r* (Fig. 82) durch Reibung an der Peripherie in Rotation. Auf dessen Axe befindet sich ein Stab *a b*, welcher gerade in den Spalt *c d* des Bretes *f g* hineinpasst und bei jeder Umdrehung durch ihn hindurchschlägt. Die entsprechenden Stösse erzeugen nun einen Ton von bedeutender Stärke, und Savart gibt an, dass er schon bei 7—8 Stössen einen Ton von gleichmässiger Stärke wahrgenommen habe. Doch ist der musikalische Charakter so tiefer Töne bis zu ungefähr 30 Schwingungen

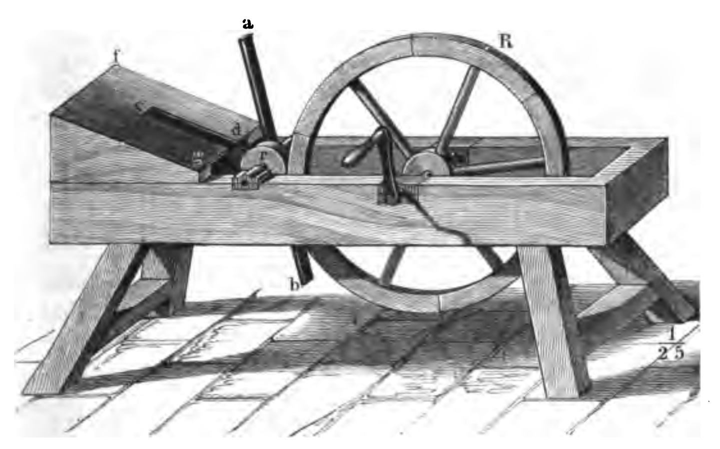



*Fig. 82.**

in der Secunde ein höchst unvollkommener, und daher werden sie in der Musik nicht verwerthet. Helmholtz ist der Ansicht, dass die tiefen Töne, welche Savart in seinen Versuchen gehört hat, Obertöne des Grundtones von 7—8 Schwingungen gewesen seien. Nach seinen Versuchen an gedeckten Orgelpfeifen, welche nur sehr schwache Obertöne besitzen und an grossen Stimmgabeln, beginnt der musikalische Charakter erst

* Müller-Pouillet, Physik.

bei ungefähr 28—30 Schwingungen. Die tiefern Töne erzeugen nur ein Schwirren und Dröhnen im Ohr.

Das Combiniren der einzelnen Schwingungen zu einem Tone ist ein Vorgang, welcher in dem Nervenapparate des Gehörs stattfindet. Wir können diesen Vorgang mit der stetigen Zusammenziehung eines Muskels vergleichen, welche wir durch schnell aufeinander folgende Reize zu erzeugen vermögen. Lassen wir z. B. in einer Secunde 8—10 elektrische Schläge auf einen Muskel einwirken, so dehnt er sich nach jedem Schlage nicht wieder vollständig aus, und steigern wir die Geschwindigkeit der Schläge noch etwas, so bleibt der Muskel während der Reizung dauernd zusammengezogen. Im Gehörorgan wird nun der Gehörnerv durch die mitschwingenden Apparate auch nicht continuirlich, sondern in schnellen Unterbrechungen erregt. Unser Gehörssinn aber, dessen Sitz wir im Gehirn suchen müssen, combinirt die schnell aufeinander folgenden Nervenerregungen, ähnlich, wie der Muskel dies thut, und aus dieser Combination entsteht die Tonempfindung.

Ferner ist es von grossem Interesse, die höchsten noch wahrnehmbaren Töne zu ermitteln. Hierüber hat Savart ebenfalls mit Hülfe eines Rades einen Versuch angestellt. Das Zahnrad *B* (Fig. 83) wird durch das grosse Rad *A* mittels einer Riemscheibe *D* in schnelle Rotation versetzt, sodass die Zähne gegen ein Kartenblatt stossen, das man auf dem Plättchen *E* vorschiebt. Da das Zahnrad, welches Savart anwendete, 720 Zähne hatte, so liessen sich damit 24,000 Stösse in der Secunde erzeugen. Der dadurch hervorgerufene Ton war sehr fein und schwach, aber noch deutlich hörbar. Ferner hat Despretz mit kleinen Stimmgabeln einen Ton von 38,016 Schwingungen erzeugt, doch sollen Töne von dieser Höhe unangenehm, ja sogar schmerzhaft für das Ohr gewesen sein.—Wir erkennen hieraus, dass eine sichere Grenze der Wahrnehmbarkeit nach der Höhe hin sich nicht angeben lässt. Soviel steht aber fest, dass über die siebente Octave, über das fünfgestrichene c hinaus, die Töne ihren an-

genehmen musikalischen Charakter verlieren, und dass auch die Bestimmung der Tonhöhe von da ab immer unsicherer wird. Daraus können wir wol mit einiger Sicherheit entnehmen, dass das zur musikalischen Perception bestimmte Organ unseres Ohres ungefähr für sieben Octaven eingerichtet ist, und diese Einrichtung ist es, welche wir in den Corti'schen Organen der Schnecke vorgefunden haben.

Die wesentliche Bedingung einer Tonempfindung besteht nach dem Vorangegangenen darin, dass eine Be-

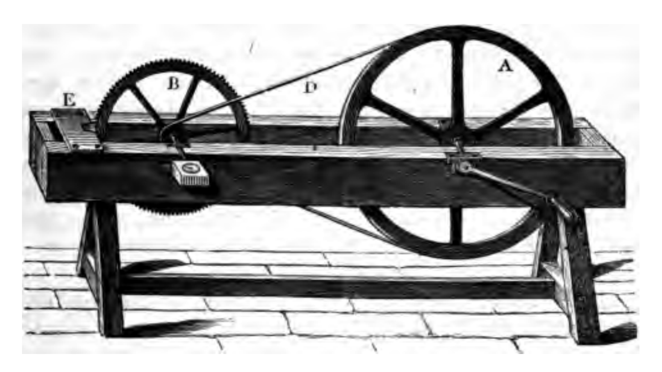



*Fig. 83.**

wegung sich in regelmässigen Perioden mit gewisser Geschwindigkeit wiederholt. Ein einziger Stoss kann niemals einen Ton hervorbringen, und wenn man daher an einem Savart'schen Rade nur einen Zahn anbringt, so kann beim Heranbringen des Kartenblattes während der Umdrehung kein Ton entstehen; dagegen hat man beobachtet, dass schon zwei nebeneinander stehende Zähne genügen, um einen Ton hervorzubringen, und zwar denselben Ton, welcher auch bei voller Zahnreihe entsteht, nur mit dem Unterschiede, dass er mit Unter-

* Müller-Pouillet, Physik.

brechungen auftritt. Der Grund ist klar, denn auch in diesem Falle ist die Periode dieselbe geblieben, wenn sie auch nur von zwei Stössen bedingt ist. Interessant ist es aber, dass schon zwei schnell aufeinander folgende Reizungen des Hörnerven genügen, um eine Tonempfindung wach zu rufen, und dass durch die Geschwindigkeit, mit welcher sie aufeinander folgen, die Tonhöhe schon vollständig gegeben ist.

Um nun zu begreifen, wie es möglich ist, dass wir mit unserm Hörnerven eine so grosse Reihe verschiedener Töne zu percipiren im Stande sind, müssen wir unsern Blick nochmals auf das Corti'sche Organ und die Vertheilung der Nervenfasern daselbst lenken. Der in die Axe der Schnecke eintretende Nerv breitet sich in feinste Fasern aus, und die einzelne Faser tritt an einen mitschwingenden Apparat heran, um von diesem aus in Erregung versetzt zu werden. Beim Erklingen eines bestimmten Tones wird daher niemals der ganze Hörnerv in Erregung versetzt, sondern nur eine Anzahl von Fasern, welche zu den in Erschütterung versetzten Organen hingehen.

Das Hören verschieden hoher Töne besteht also schliesslich in nichts anderm als in einer Erregung verschiedener Fasern des Hörnerven. Das Gehirn erhält durch den Hörnerven mittels verschiedener Fasern Nachricht von Tönen verschiedener Höhe, und dadurch gewinnt es ein Zeichen, an welchem es gleichsam diejenigen mitschwingenden Organe herauserkennt, welche auf den Ton angesprochen haben. Freilich ist dieses Erkennen ein ganz unbewusstes, wie viele Fähigkeiten, die wir durch Uebung erworben haben, ähnlich wie wir beim Bewegen unserer Gliedmassen diejenigen Nerven und Muskeln herausfinden, deren Thätigkeit zum beabsichtigten Zweck führt, ohne von der Existenz dieser Organe ein Bewusstsein zu haben.

Die Vermittelung verschiedener Tonempfindungen durch verschiedene Nervenfasern des Hörnerven ist ein Vor-

gang, welcher sich analogen Vorgängen im Gebiete der Sinnesorgane vollkommen anschliesst. Sie lässt sich aus jener Eigenschaft ableiten, welche man specifische Energie der Sinnesnerven nennt, eine Eigenschaft, welche wir schon beim Sehnerven näher kennen gelernt haben. Nicht allein dass dieser Nerv auf jeden beliebigen Reiz, sei es ein mechanischer, elektrischer oder Lichtreiz, immer mit Lichtempfindung antwortet, sondern er besteht auch noch, wie wir annehmen müssen, aus mindestens drei verschiedenen Fasergattungen, von denen je eine für die drei angenommenen Grundfarben roth, grün, violett bestimmt ist. Im Hörnerven ist dieses Princip der Arbeitstheilung noch weiter ausgebildet. Hier hat es eine Nervenfaser immer nur mit einem einzigen Ton von ganz bestimmter Höhe zu thun, und kann niemals dazu dienen andere Töne hörbar zu machen.

Wir können daher annehmen, dass, wenn einzelne Fasern der Schnecke auf anderm Wege als durch einen Ton erregt werden, z. B. durch mechanische oder elektrische Reize, der ihnen gehörige Ton erklingt. In der That hört man bei Durchleitung elektrischer Ströme durch den Kopf Töne und Geräusche, die hier durch Reizung des ganzen Hörnerven entstehen. Ferner sind Ohrenkranke beobachtet worden, welche dauernd die subjective Empfindung eines bestimmten Tones im Ohre haben, und man hat sich dies so erklärt, dass einzelne Nervenfasern in den Corti'schen Organen durch krankhafte Processe gereizt werden. Auch hat man bei einigen Kranken Taubheit für eine bestimmte Reihe von Tönen beobachtet, und dies daraus abgeleitet, dass in solchen Fällen bestimmte Corti'sche Organe zerstört waren.

## Siebentes Kapitel.

Der Klang. — Die Entstehung der Obertöne. — Wahrnehmung derselben durch Resonatoren. — Graphische Darstellung der Klangfarbe.

Es ist uns aus der Erfahrung bekannt, dass der Ton verschiedener Instrumente und der menschlichen Stimme sich durch ihren Klang oder die Klangfarbe voneinander unterscheiden. Wenn wir einen Ton von bestimmter Höhe z. B. das a' singen, wenn wir ihn auf dem Klavier anschlagen, wenn wir ihn auf einer Violine anstreichen oder auf einer Flöte, Trompete oder Orgel ertönen lassen, immer haben wir einen Ton von gleicher Höhe, der in der Secunde 440 Schwingungen macht, und doch sind diese Töne in ihrem Klang himmelweit voneinander verschieden. — Woher kommt das?

Wir müssen, um auf den Grund dieser Thatsache zu dringen, zu den Erscheinungen der Schwingung zurückkehren. Da nämlich die Töne der angeführten Instrumente in gleicher Höhe auch unbedingt dieselbe Anzahl von Schwingungen besitzen, so kann die Zahl der Schwingungen unmöglich den Klang des Tones bestimmen, und es bleibt daher nichts weiter übrig als die Ursache des verschiedenen Klanges in einer andern Eigenschaft jeder einzelnen Schwingung zu suchen.

Es ist nun den Musikern seit längerer Zeit bekannt, dass mit jedem Tone unserer Instrumente immer eine Anzahl von bestimmten höhern Tönen mitklingt. Diese Töne hat man in der Akustik die mitklingenden Töne, oder die Obertöne des betreffenden Grundtones genannt. Wenn wir z. B. auf dem Klavier ein c anschlagen, so kann ein musikalisch geübtes Ohr in diesem Tone schon das nächsthöhere c herauserkennen. Noch besser gelingt dies mit Vorrichtungen, von denen wir unten eingehender sprechen werden.

Die Entstehung dieser Obertöne, welche von Helmholtz auf sehr sinnreiche Weise untersucht worden ist, lässt sich am leichtesten an einer schwingenden Saite begreifen. Man stelle sich eine in Schwingung versetzte gespannte Saite vor, so besteht dieser Vorgang im wesentlichen darin, dass die Saite sich abwechselnd nach der einen und andern Richtung hin krümmt. Doch so einfach gestaltet sich hierbei der Vorgang nicht, sondern es treten noch andere Bewegungen hinzu. Eine schwingende Saite hat die Neigung sich zunächst in zwei Hälften zu theilen, von denen jede wiederum ihre eigne Schwingung macht, wie Fig. 80 *b* zeigt. Wir können uns nun vorstellen, dass während die ganze Saite ihre Schwingung ausführt, zugleich auch jede Hälfte ihre eigenen Schwingungen macht, und so gesellt sich zu der Schwingung des Grundtones ein zweiter leiserer Ton, der erste Oberton hinzu. Dieser muss offenbar die Octave des Grundtones sein, denn da er durch die Schwingungen der halben Saite erzeugt wird, so muss die Schwingungszahl desselben doppelt so gross sein als die des Grundtones. Während demnach die ganze Saite eine Schwingung ausführt, vollenden die beiden Hälften derselben zwei Schwingungen.

Nun gesellt sich aber zu diesem Vorgange noch eine weitere Complication. Es bleibt bei der Theilung der Saite in zwei Hälften nicht stehen, sondern es findet auch in geringerem Grade gleichzeitig eine Theilung in drei gleichlange Theile statt, wie es Fig. 80 *c* darstellt. Jeder dieser drei Theile schwingt wieder für sich, und zwar dreimal schneller als die ganze Saite, und diese Schwingung erzeugt den zweiten Oberton. Wenn wir uns daher vorstellen, dass sich diese drei Schwingungen miteinander combiniren, so erhalten wir für irgendeinen Punkt der Saite schon eine sehr complicirte Bewegung, die wir aber aus den einzelnen Bewegungen zusammensetzen könnten.

Mit der Theilung in drei Theile hat jedoch der Vorgang noch nicht sein Ende erreicht, sondern die Thei-

lung schreitet weiter in vier, fünf, sechs u. s. w. Theile vor, und indem $^1/_4$, $^1/_5$, $^1/_6$ u. s. w. der ganzen Länge seine eigenen Schwingungen ausführt, entstehen eine ganze Reihe von Obertönen nach einem ganz bestimmten Gesetze. Dieselben werden nach der Höhe zu immer schwächer und weniger wahrnehmbar, sodass der Grundton vorwiegt; aber sie geben dem Grundton einen eigenthümlichen Charakter: die Klangfarbe.

Man kann sich an einer Saite von dem Vorhandensein der Obertöne durch einige Versuche leicht überzeugen, und zugleich auch die Tonhöhe derselben feststellen. Zu einem solchen Versuche kann man die Saite eines Monochords aber auch ebenso gut die eines Klaviers oder eines Streichinstruments benutzen. Man messe sich zunächst genau die Hälfte der Saite aus, von der wir annehmen wollen, dass sie den Ton c habe. Dies wird uns am schnellsten gelingen, wenn wir die Saite in der Mitte mit dem Finger festhalten und diesen so lange verschieben, bis die angezupfte oder gestrichene Hälfte die Octave c′ gibt. Nun lasse man den linken Zeigefinger dicht über dem Mittelpunkte abgehoben liegen, zupfe die Saite mit der rechten Hand in einiger Entfernung davon kräftig an, und gebe schnell darauf der Saite mit dem linken Zeigefinger einen leichten Schlag, so wird dadurch der Grundton der Saite gedämpft, ebenso eine Reihe von Obertönen, und es kommt nur der erste Oberton deutlich zum Vorschein, weil die Schwingungen beider Hälften nicht gestört worden sind. Dieser Ton muss aber schon vorher vorhanden gewesen sein.

Auf dieselbe Weise gelingt es auch höhere Obertöne nachklingen zu lassen, indem wir den dämpfenden Finger auf $^1/_3$, $^1/_4$ u. s. w. auflegen. Sie werden alsdann um so schwächer, je höher sie sind.

Der Grundton ist es, welcher die Höhe aller Obertöne genau bestimmt. Denn während der Grundton eine Schwingung macht, macht der erste Oberton zwei, der zweite drei, der dritte vier, der vierte fünf Schwin-

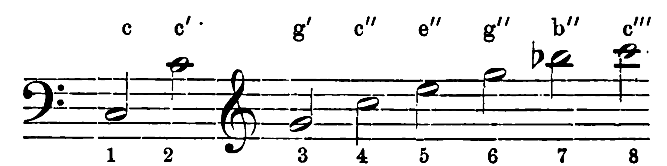
gungen u. s. w. Ist der Grundton also ein c, so ist die Reihe der Obertöne: c′ g′ c″ e″ g″ b″ c‴, denn während c **eine** Schwingung macht, vollendet c′ zwei, g′ drei, c″ vier, e″ fünf, g″ sechs, b″ sieben, c‴ acht Schwingungen.

Dass eine Saite sich in einem solchen Schwingungszustande befinden kann, in welchem die beiden Hälften oder jeder dritte und vierte Theil der Saite für sich schwingt, lässt sich noch durch einen besondern Versuch demonstriren, der jedem Violinspieler aus der Praxis bekannt sein wird. Wenn man auf den Mittelpunkt der Saite den Finger leicht auflegt, ohne zu drücken, und die Saite anstreicht, so ertönt sie in der Octave, und zwar in einer zarten Klangfarbe, welche man **Flageolet** nennt und häufig in der Musik anwendet. Messen wir durch den berührenden Finger ein Drittel der Saite ab, so ertönt die Quinte der Octave. In diesem Falle schwingt nicht allein das angestrichene Drittel, sondern es schwingen auch die beiden andern Drittel, jedes für sich, wie es Fig. 80 *c* angibt. In der Mitte dieser beiden Drittel liegt dann ein Punkt, welcher sich in Ruhe befindet; und dass dies wirklich der Fall ist, kann man auf folgende Weise sehen. Man setze ein Papierschnitzelchen als Reiter auf die Saite, so wird derselbe durch die Schwingungen beim Streichen leicht abgeworfen werden. Wenn wir den Reiter aber gerade auf den Theilungspunkt setzen, so bleibt er beim Streichen in Ruhe. Einen solchen in Ruhe bleibenden Punkt nennt man einen **Knotenpunkt**.

Halten wir den Finger auf ein Viertel der Saite, so ertönt beim Streichen die zweite Octave. Die schwingende Saite theilt sich in vier gleiche Theile, die durch drei Knotenpunkte getrennt sind; und so fortschreitend lassen sich noch höhere Flageolettöne erzeugen.

Man erkennt nun, dass die Reihe der Flageolettöne mit der der Obertöne genau übereinstimmt, da sie durch Theilungen der Saite nach der Reihe der gan-

zen Zahlen entstehen. In Noten ausgedrückt lassen sich die ersten sieben Obertöne folgendermassen schreiben, wenn wir den Grundton c annehmen:




die untern Zahlen geben hierbei an, in welchem Verhältnisse die Schwingungszahlen zueinander stehen. Die Intervalle, welche zwischen je zwei aufeinander folgenden Obertönen liegen, sind hiernach folgende: 1) Octave, 2) Quinte, 3) Quarte, 4) grosse Terz, 5) kleine Terz, 6) grosse Secunde u. s. w.

Man sieht, wie die Intervalle zwischen diesen Tönen immer kleiner werden. Je höher, desto undeutlicher werden daher im allgemeinen die Obertöne, desto schwerer heben sie sich voneinander ab.

Dem ungeübten Ohr ist es nun schwer, in einem Klange die darin befindlichen Obertöne herauszuhören. Das Ohr ist daran gewöhnt einen Ton als ein Ganzes aufzufassen und hierin überwiegt der Grundton so stark, dass es uns nicht leicht wird unsere Aufmerksamkeit von ihm abzuziehen. Ein sehr wichtiges und bequemes Hülfsmittel ist daher von Helmholtz erfunden worden, wodurch jede Unsicherheit und jede Täuschung bei der Beobachtung der Obertöne ausgeschlossen wird. Er bedient sich zu diesem Zweck der sogenannten Resonatoren, Hohlkugeln, mit zwei Oeffnungen, wie wir sie in Fig. 84 abgebildet sehen. Das spitze Ende des Resonators wird in das Ohr gesteckt, und wenn nun ein Ton entsteht, welcher mit dem Eigenton des Resonators über-


*Fig. 84.*

einstimmt, so hören wir diesen Ton in verstärktem Grade. Der Eigenton des Resonators ist ein ganz bestimmter, wie der eines jeden begrenzten Luftraumes einer Lippenpfeife, Flöte, und wir finden ihn, wenn wir den Resonator von der weiten Oeffnung aus anblasen. Er ist um so höher, je kleiner die Kugel, um so tiefer, je grösser sie ist. Sobald daher dieser Ton in der Umgebung erklingt, so wird der Resonator in Mitschwingung versetzt und der Ton verstärkt sich. Dagegen wird jeder andere Ton durch ihn gedämpft, was wir deutlich wahrnehmen, wenn wir das andere Ohr zustopfen und jeden andern Zugang der Schallwellen als durch den Resonator dadurch abschliessen.

Um nach dieser Methode Obertöne zu erkennen, bedient man sich einer ganzen Reihe von Resonatoren verschiedener Grösse. Man lässt auf einem Instrumente einen Grundton erklingen, und setzt diejenigen Resonatoren, welche den Obertönen desselben entsprechen, an das Ohr. Je nachdem sie nun in grösserer oder geringerer Stärke mitklingen, werden sie sich dem Ohre bemerkbar machen.

Nach dieser Methode sind von Helmholtz die Töne der verschiedenartigen Instrumente und auch der menschlichen Stimme untersucht worden. Das Resultat dieser Untersuchung lässt sich in wenigen Worten folgendermassen zusammenfassen:

1) Es gibt fast kein musikalisches Instrument, dessen Ton nicht von Obertönen begleitet ist.

2) Die Zahl und Stärke der Obertöne, welche bei verschiedenen Instrumenten mitklingen, sind verschieden und erzeugen dadurch die charakteristische Klangfarbe jedes Instrumentes.

Alle in der Musik gebräuchlichen Instrumente zeigen in ihrem Tone mehr oder weniger ein Mitklingen von Obertönen. Wir haben bisher das Entstehen von Obertönen nur an schwingenden Saiten vor Augen gehabt, aber auch jeder andere elastische schwingende Körper zeigt mehr oder weniger die Neigung, durch Theilung der Schwingungen Obertöne zu erzeugen. Am we-

nigsten ist dies in einem abgegrenzten Luftraume der Fall, z. B. wenn wir eine Flasche anblasen oder in einem Resonator. Ebenso nähern sich die Schwingungen einer Stimmgabel der einfachsten Schwingungsform, welche nur von schwachen Obertönen begleitet ist. Künstlich kann man nach Helmholtz einen von Obertönen ganz gereinigten Ton herstellen, wenn man eine Stimmgabel auf einem Kasten befestigt, welcher auf Kautschukröhren ruht, damit der Ton nicht zum Boden hin fortgepflanzt werde, und wenn man vor die angeschlagene Stimmgabel einen Resonator von gleicher Tonhöhe mit seiner Oeffnung gegenbringt. Die etwaigen Obertöne von Stimmgabel und Resonator löschen sich dann gegenseitig, und es bleibt ein reiner Ton verstärkt übrig.

In Fig. 85 sehen wir nach der Darstellung von Helmholtz einen solchen Apparat abgebildet, in welchem die Stimmgabel *a* auf elektro-magnetischem Wege durch den Elektromagneten *b b* in dauernde Schwingung versetzt werden kann. Der Resonator *i* besitzt eine Klappe *m*, bei deren Oeffnung der Ton der Stimmgabel zum Vorschein kommt. Wir werden den Gebrauch dieses Apparates weiter unten noch kennen lernen.

Wenn wir auf den Ton einer Stimmgabel oder eines angeblasenen Luftraumes achten, so wird er uns zwar sehr rein, aber doch h o h l und l e e r vorkommen. Der Ton erscheint uns kraftlos und unbefriedigend, es mangelt ihm, möchte man sagen, jeglicher Charakter, und dieser Mangel beruht offenbar auf der Abwesenheit oder der Schwäche von Obertönen. Diese sind es, welche erst den Klang erzeugen.

Man unterscheidet daher in akustischer Hinsicht T o n und K l a n g voneinander.

Ein T o n besteht aus einfachen Schwingungen, in welchen keine Schwingungen von Obertönen enthalten sind, und welche ihrer Form nach mit den Pendelschwingungen übereinstimmen.

Ein K l a n g ist ein zusammengesetzter Ton, der ne-

ben dem Grundtone eine Reihe von Obertönen enthält, und daher aus Schwingungen von mehr oder weniger complicirter Form besteht.

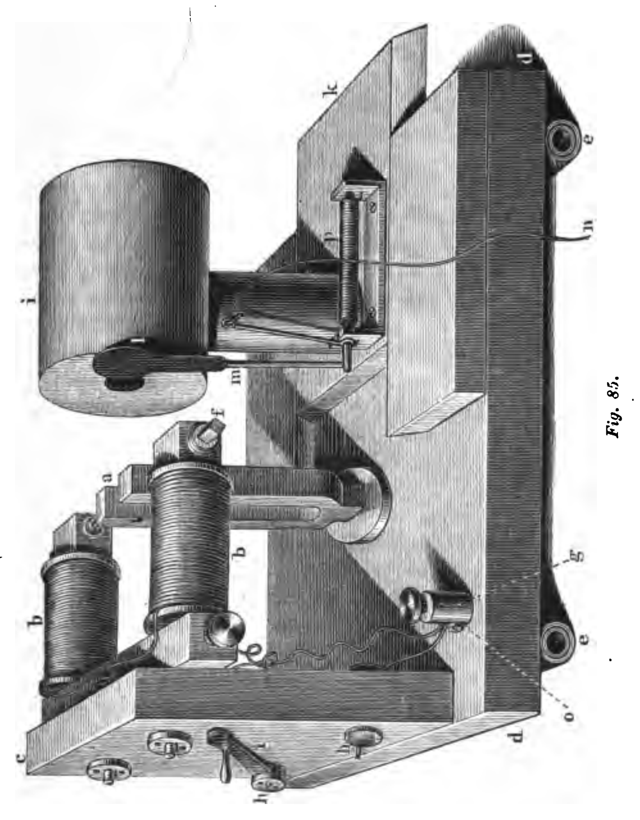


*Fig. 85.*

Man kann sich von der verschiedenen Form, welche die Schwingungen der Klänge annehmen, eine richtige Vorstellung machen, wenn man auf die graphische Methode, die Schwingungen darzustellen, eingeht. Wenn

wir uns die Schwingungen einer Stimmgabel auf einem rotirenden Cylinder aufgezeichnet denken, wie wir es bereits früher auseinander gesetzt haben, so haben wir ein Bild von der Form der Schwingung. Die horizontale Linie in Fig. 86, welche man Abcisse nennt, bedeutet die Zeit, denn sie gibt an, in welcher Zeit eine Schwingung vollendet ist. Die Curve stellt uns in Form einer Welle die Schwingung der Stimmgabel dar, die Höhe der Welle bedeutet die Amplitude oder Elongation der Schwingung, und ihre Länge die Dauer einer Schwingung. Denn es ist klar, dass wenn die Schwingungen der Gabel grösser werden, die Wellen an Höhe demgemäss zunehmen müssen, und dass wenn die Schwingungen langsamer werden, die Wellen gestreckter und länger werden müssen.

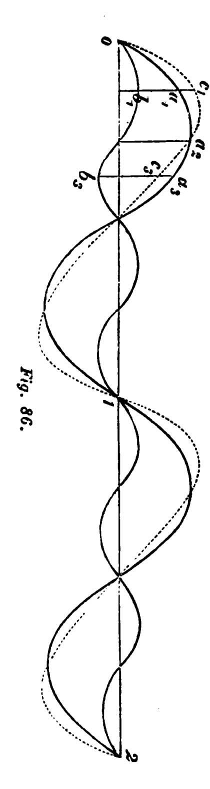


Fig. 86.

Zwischen den Punkten 0 und 1 vollendet die Stimmgabel eine ganze Schwingung 0 $a_1$ $a_2$ $a_3$ 1; es ist bis dahin eine ganze Periode der Schwingung abgelaufen, weil nun ein zweiter mit diesem ganz identischer Abschnitt der Bewegung von 1 bis 2 folgt, in welchem die Richtung der Bewegung und ihre Aufeinanderfolge ganz dieselbe ist. Der über der Abcisse gelegene Theil der Curve bedeutet die Bewegung nach der einen, der untere Theil die nach der andern Seite. Hätten wir es mit den Schallwellen der Luft zu thun, so könnten wir den obern Theil, den Wellenberg, der Luftverdichtung, den untern Theil, das Wellenthal, der Luftverdünnung gleichsetzen. Beide zusammen machen

eine ganze Wellenbewegung, eine ganze Schwingungsperiode aus.

Eine Curve von dieser Form, welche ganz symmetrisch gestaltet ist, d. h. mit derselben Geschwindigkeit ansteigt und abfällt, und in ihrer Form nach mathematischer Berechnung das Gesetz der Pendelschwingung darstellt, gibt uns zugleich ein Bild von den Schwingungen eines einfachen Tones. So sind annähernd die Schwingungen einer Stimmgabel oder eines abgeschlossenen Luftraumes beschaffen, die unserm Ohre deshalb einen so eigenthümlichen Eindruck machen.

Wir wollen nun betrachten, welche Aenderung eine solche Schwingung erleidet, wenn sich ihr ein Oberton zugesellt. Es sei in 0 $b_1$ $b_3$ der erste Oberton des Grundtones dargestellt. Dieser macht zwei Schwingungen, während der Grundton eine macht, es sind daher in dem Zeitraume 0 1 zwei Perioden abgelaufen. Um die beiden Töne zu combiniren, müssen wir uns vorstellen, dass ein Punkt des schwingenden Körpers, z. B. der Zeichenstift der Stimmgabel, gezwungen ist, gleichzeitig die Bewegungen beider Schwingungen nachzumachen. Denken wir uns also, es habe dieser Punkt die Bewegung bis $a_1$ vollendet, so wird er sich von der Ruhelage um eine gewisse Grösse entfernt haben. Diese Entfernung ist aber nicht etwa 0 $a_1$, sondern wir müssen daran denken, dass bei der Entstehung der Curve der Cylinder, auf dem sie sich abzeichnet, eine Rotation gemacht hat, wenn der Zeichenstift sich in $a_1$ befindet. Die Entfernung desselben von der Ruhelage ist also die auf der Abcisse senkrecht stehende Linie $a_1$, welche man in der Geometrie eine Ordinate nennt.

In dem Moment, wo die Schwingung des Grundtones den Punkt $a_1$ einnimmt, befinde sich ferner die Schwingung des Obertones gerade in dem Maximum ihrer Amplitude. Die Ordinate $b_1$ gibt uns die Grösse dieser Amplitude an; und wenn wir uns nun beide Schwingungen miteinander combinirt denken, so haben wir nichts

weiter zu thun, als die Ordinaten $a_1$ und $b_1$ zueinander zu addiren, um die Stellung des schwingenden Punktes in dem combinirten Tone zu finden. Wir erhalten auf diese Weise eine neue Schwingungsform. Hier ist die Ordinate $c_1$ die Summe von $a_1$ und $b_1$. Dagegen ist $c_3$ die Differenz der entsprechenden Grössen $a_3$ und $b_3$, weil in $a_3$ die Bewegung nach oben, in $b_3$ aber nach unten hin erfolgt ist. Wenn wir daher überall die Ordinaten, welche auf derselben Seite der Abcisse liegen, addiren, und die, welche auf entgegengesetzten Seiten liegen, subtrahiren, und die Summen und Differenzen auf die Abcisse in gleichen Abständen auftragen, so erhalten wir die punktirte Curve, welche in ihrer Gestalt von der ursprünglichen erheblich abweicht. In ihrem Anfangstheile steigt sie steiler an und erreicht früher ihr Maximum, und in ihrem absteigenden Theile fällt sie gestreckter und allmählicher ab. Das Wellenthal muss natürlich symmetrisch zum Wellenberge geformt sein.

Es entsteht auf diese Weise eine ganz neue Schwingungsform, welche unserm Ohre wieder einen besondern Eindruck macht. Die Tonhöhe dieses zusammengesetzten Tones ist es aber keineswegs, die sich hierbei geändert hat. Denn wir erkennen sehr leicht, dass in der Zeit von 0 bis 1 eine ganze Periode der neuen Schwingung abgelaufen sein muss. Die Schwingungsperiode, resp. die Schwingungszahl beider Töne, ist also genau dieselbe und die Tonhöhe muss auch dieselbe geblieben sein. Aber der Klang beider ist verschieden.

Wir können hiernach folgenden Satz aussprechen: Die Klangfarbe ist von der Gestalt der Schallwelle abhängig.

Wir können uns ausser der Form $c$, $c_3$ auch noch andere Formen der Schallwellen vorstellen, welche ganz dieselbe Schwingungsperiode besitzen. Nehmen wir an, dass ausser dem ersten Obertone des Grundtones auch noch der zweite hinzukäme, welcher in dem Zeitraume von 0 bis 1 drei Schwingungen vollendete,

so würde offenbar die Form der neuen Schwingung noch unregelmässiger aussehen als jene. Wir würden sie erhalten, wenn wir die Ordinaten der Schwingungen des dritten Obertones mit der Schwingung $c, c_3$ .. combiniren würden. Man sieht, dass nach jeder Periode die Summen und Differenzen sich immer wiederholen müssten. Die neue Schwingung wird also auch eine gleichmässig periodische sein und dieselbe Dauer haben. Die Tonhöhe bleibt dabei dieselbe, der Klang aber wird wieder ein anderer sein.

Die Mannichfaltigkeit der Form, welche auf diese Weise die Schallwelle annehmen kann, ist, wie man sich leicht vorstellen wird, eine ausserordentlich grosse. Denn nicht allein können noch eine grössere Zahl von Obertönen hinzukommen, sondern es kann auch der eine oder andere der Obertöne mehr oder weniger stark oder schwach vertreten sein, und schliesslich kann dieser oder jener Oberton gänzlich fehlen, sodass verschiedenartige Gruppen von Obertönen sich zum Grundtone hinzugesellen. Alle diese Variationen geben immer dieselbe Tonhöhe, aber alle geben sie verschiedene Klänge, die unser Ohr deutlich empfindet. So kann der Grundton mit dem zweiten und vierten oder mit dem dritten und fünften Obertone zusammengesetzt gedacht werden u. s. w., jedesmal wird der Klang ein anderer sein.

Der verschiedene Klang unserer musikalischen Instrumente lässt sich nun zur Genüge daraus erklären, dass die mitklingenden Obertöne der ursprünglichen Schwingung des Tones eine eigenthümliche Form geben, die bei jedem Instrumente eine andere ist. Diese Schwingungsform fasst das Ohr zunächst als ein Ganzes auf und empfindet es als Klang. Die Wissenschaft aber hat die Zerlegung dieses Ganzen in den Grundton und die Obertöne nachgewiesen.

## Achtes Kapitel.

Die Zerlegung der Klänge nach dem Fourier'schen Satze. — Helmholtz'sche Theorie über die Wahrnehmung der Klänge. — Zusammensetzung von Klängen durch elektromagnetische Stimmgabelapparate.

Eine Frage, welche sich uns nach den Betrachtungen des vorigen Kapitels aufdrängt, ist die, ob wir alle periodischen Schallschwingungen, die eine Tonempfindung erzeugen, uns so zusammengesetzt vorstellen dürfen, dass sie in einen Grundton und in eine Reihe von Obertönen verschiedener Stärke zerlegt werden können.

Wir wollen annehmen, wir hätten es mit einer recht complicirten Form der Schallwelle zu thun, etwa mit einer, die wie nebenstehende Fig. 87 aussieht, die ganz willkürlich gezeichnet sein mag, und von der wir nicht angeben können, wie sie unserm Ohre klingt. Die Figur stellt nur eine Schwingungsperiode von *0* bis *1* vor, der Wellenberg ist in diesem Falle dem Wellenthale ganz symmetrisch, derselbe steigt steil in die Höhe, fällt nach dem Maximum ziemlich schnell von seinem Gipfel herab, sinkt dann eine Strecke lang sehr langsam, fällt wieder steil herab und geht mit einem allmählichen Sinken in das Wellenthal über, das in umgekehrter Ordnung ebenso gestellt ist wie der Wellenberg.

Haben wir es mit einer Schallwelle in der Luft zu thun, so können wir aus dieser Gestalt schliessen, dass die Verdichtung der Luft schnell bis zum Maximum wächst, erst schnell wieder abnimmt, dann langsam, dann wieder schnell und zuletzt allmählich, und dass die Verdünnung der Luft erst allmählich, dann schnell, dann wieder allmählich und schliesslich schnell zu-

nimmt, um dann mit grosser Geschwindigkeit in die Verdichtung der zweiten Schwingungsperiode bei *1* überzuspringen. Ist es nun möglich, fragen wir, dass eine solche Schwingung zusammengesetzt sei aus einem Grundtone, dessen Schwingung die Form der Pendelschwingung besitzt, wie wir sie in Fig. 86 abgebildet haben, und aus einer Reihe von Obertönen, von denen auch jeder die Form der Pendelschwingung besitzt, in welcher Wellenberg und Wellenthal nach einem bestimmten Gesetze mit derselben Geschwindigkeit aufsteigen, mit welcher sie absteigen?

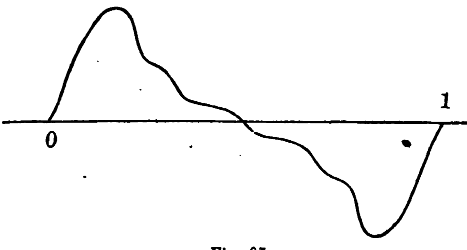



*Fig. 87.*

Die Aufgabe, welche wir hier zu lösen haben, ist offenbar eine rein mathematische. Wir hätten zu ermitteln, ob wir aus dem Flächenraume der gedachten Schwingungscurve erst eine Pendelcurve herausschneiden können, welche dieselbe Schwingungsdauer von *0* bis *1* hat, und welche dem Grundtone entsprechen würde. Dann müssten wir probiren, ob der übrigbleibende Raum dazu ausreicht, um Pendelcurven von halber Schwingungsdauer oder doppelter Schwingungszahl, von dreifacher, vierfacher, fünffacher Schwingungszahl u. s. w. daraus herzustellen, welche den Obertönen entsprechen. Dabei wäre natürlich zu ermitteln, wie viele solcher Pendelcurven von mehrfacher Schwingungszahl dazu nöthig sind, welche Schwingungszahl sie haben, und

16*

wie sich ihre Höhen zueinander und zum Grundtone verhalten. Schliesslich darf, was das Wichtigste ist, auch kein Schnitzelchen von dem Flächenraume der gegebenen Schwingungscurve übrig bleiben.

Wir stehen hier vor einem schwierigen mathematischen Problem, welches zum Glück, lange bevor man etwas von Obertönen wusste, von der Wissenschaft gründlich gelöst worden ist. Der ausgezeichnete französische Mathematiker Fourier, geb. 1768, hat den Nachweis geliefert, dass jede beliebig gestaltete Schwingung, wenn sie nur immer in derselben Periode wiederkehrt, zerlegt werden kann in eine Summe von Pendelschwingungen.

Der Beweis für diesen Satz kann nur mit Hülfe der höhern Mathematik geführt werden. Wir wollen uns daher mit der Versicherung begnügen, dass derselbe als unumstösslich zu betrachten ist, und dazu übergehen, seine Anwendung auf die Theorie der Klänge, welche wir Helmholtz zu verdanken haben, näher ins Auge zu fassen.

Der Fourier'sche Satz zeigt eine merkwürdige Uebereinstimmung mit der Erscheinung der Obertöne. Er zeigt nämlich, dass wenn die Schwingungszahl der ursprünglichen Schwingung eins ist, dass dann die der ersten Pendelschwingung auch eins, der zweiten zwei, der dritten drei, der vierten vier u. s. w. ist. Kurzum wir erkennen, dass die erste Pendelschwingung den Grundton, die folgenden aber die Reihe der Obertöne bedeuten. Während wir also oben aus einem Grundtone mit seinen Obertönen eine complicirte Schallschwingung construirt haben, gelangen wir jetzt auf umgekehrtem Wege mit Hülfe des Fourier'schen Satzes von jeder beliebigen periodischen Schallschwingung durch Zerlegung derselben zu einem Grundtone mit einer Reihe von Obertönen.

Es ist höchst erstaunlich, dass die Natur im Stande ist, jenes Problem, von dem wir gesprochen haben, praktisch zu lösen.

Wenn wir einen Ton erklingen lassen, und eine Resonanzkugel an das Ohr setzen, welche einem Obertone desselben entspricht, so hören wir diesen Oberton in verstärktem Grade heraus. Hier findet, bevor die Schallwellen in das Ohr dringen, eine Analyse eigener Art statt, durch welche aus der zusammengesetzten ursprünglichen Schwingung eine bestimmte pendelartige Schwingung gleichsam ausgeschnitten wird, um abgesondert von der übrigen Klangmasse dem Ohre zugeführt zu werden. Der Resonator ist also ein zerlegender Apparat, welcher genau nach dem Fourier'schen Satze arbeitet.

Wie aber verhalten sich denn die innern Organe unseres Ohres selbst, wenn ein zusammengesetzter Klang ihnen zugeleitet wird?

Wenn eine Violine und eine Flöte den Ton *a'* von 440 Schwingungen angeben, so werden jedenfalls in beiden Fällen mitschwingende Apparate des Ohres in Bewegung gesetzt, welche auch 440 Schwingungen in der Secunde machen. Nun fragt es sich, ob dieser mitschwingende Apparat einmal die Schwingungen des Violintones genau nachahmt, und das andere mal die Schwingungen des Flötentones, die beide voneinander verschieden sein müssen, und ob uns auf diese Weise der Unterschied des Klanges zur Kenntniss kommt.

Wir können mit Entschiedenheit die Behauptung aufstellen, dass die Sache sich nicht so verhalten kann.

Nehmen wir an, der mitschwingende Apparat stehe mit einer bestimmten Nervenfaser in Verbindung, welche durch ihn in Erregung versetzt wird. Nun wissen wir aus der Lehre von der Nerventhätigkeit, dass ein Nerv, auf irgendeine beliebige Weise gereizt, immer nur denselben Effect hervorruft. Mögen wir einen Muskelnerven chemisch, elektrisch, mechanisch reizen, immer entsteht dadurch nichts anderes als eine Muskelzuckung.

Die Nervenfaser des mitschwingenden Apparates wird also beidemale gereizt, ohne dass der Zustand der Erregung ein verschiedenartiger sein könnte. Folglich könnte auch in beiden Fällen die Tonempfindung nicht verschieden sein. Wir müssen sogar annehmen, dass wenn jene Nervenfaser auf elektrischem oder chemischem Wege gereizt würde, die Tonempfindung dieselbe sein würde. Dafür spricht noch der Umstand, dass bei Erkrankungen des innern Ohres zuweilen einzelne, sogenannte subjective Töne empfunden werden, ohne dass dabei irgendwelche Schallschwingungen stattfinden. Wir müssen annehmen, dass in solchen Fällen einzelne Nervenenden durch abnorme Reize erregt werden.

Die Mitschwingung eines einzigen Organes im Ohre, welches von einer oder einer gewissen Anzahl von Nervenfasern versorgt wird, kann uns von dem Klangunterschiede einer Violine oder einer Flöte keine Kunde geben. Ein Ton von 440 Schwingungen wird zwar in beiden Fällen dasselbe Organ in Mitschwingung versetzen, aber nach den Gesetzen der Akustik müssen ausser diesem Organe noch andere in Mitschwingung versetzt werden; und das sind diejenigen Organe, welche auf die Obertöne des erklingenden Tones abgestimmt sind.

Denken wir uns eine Anzahl Personen, von denen jede ihr Ohr mit einem bestimmten Resonator bewaffnet habe, die erste mit dem des Grundtones für den auf der Violine angegebenen Ton, die zweite mit dem des ersten Obertones, die dritte mit dem des zweiten u. s. w., soviel es merkbare Obertöne darin gibt, so wird keine der Personen, wenn jeder andere Zugang des Schalles als durch den Resonator ausgeschlossen ist, den Klang einer Violine vernehmen. Jede empfindet nur einen einfachen Ton, der ungefähr so wie der des angeblasenen Resonators klingt, denn der Violinton wird durch die Resonatoren in seine Elemente zerlegt, von denen jedes einzeln zur Wahrnehmung

kommt. Nun denken wir uns ferner, dass alle diese Einzelempfindungen zu einer gemeinsamen Empfindung combinirt werden könnten, so haben wir ein Bild von dem beim Hören eines Klanges stattfindenden Processe.

Die Schnecke des Ohres ist ähnlich wie eine Reihe abgestimmter Resonatoren, ein analysirender Apparat, welcher streng nach dem Gesetze des Fourier'schen Satzes arbeitet und das Problem desselben mit Leichtigkeit praktisch löst. Das Organ von 440 Schwingungen wählt sich den Grundton aus, das von 2 × 440 Schwingungen den ersten Oberton, das von 3 × 440 Schwingungen den zweiten u. s. w. Jedes mitschwingende Organ schwingt ferner in entsprechender Stärke, wie sie den Obertönen des erzeugten Klanges zukommt; und auf diese Weise findet hier eine Zerlegung des ganzen Klanges in seine einzelnen Töne statt, wie sie nicht vollkommener erdacht werden kann.

Auf den Vorgang der Zergliederung folgt aber wieder ein Vorgang der Combination, der in andern Organen stattfindet. Der Grundton, sowie alle Obertöne erregen, jeder für sich, eine bestimmte Nervenfaser, und jede Nervenfaser sendet ihre Erregung isolirt zum Gehirn. Hier aber, wo der uns noch ganz räthselhafte Vorgang der Empfindung stattfindet, werden auf eine ebenso unbegreifliche Weise die einzelnen Empfindungen zu einer gemeinsamen vereinigt, aus welcher die Klangempfindung hervorgeht.

Wir sind in unserer eben gegebenen Darstellung der Theorie von Helmholtz consequent gefolgt, welche uns alle Thatsachen am besten erklärt. Man darf freilich nicht vergessen, dass man bisjetzt das Mitschwingen abgestimmter Apparate in der Schnecke des Ohres nicht direct beobachtet hat. Aber es ist dies auch die einzige Voraussetzung, welche zum Aufbau der genannten Theorie nothwendig ist, und diese Voraussetzung ist in Anbetracht des Baues der Corti'schen Organe so ausser-

ordentlich wahrscheinlich, dass wir diese Theorie als eine wohlgegründete ansehen können. Wir wollen jedoch nicht unterlassen, noch ein Experiment anzuführen, durch welches Helmholtz seiner Theorie noch eine wichtige Stütze verliehen hat.

Fig. 88.

Wenn ein Grundton mit einem zu ihm passenden Obertone einen bestimmten Klang hervorbringt, so kann die Combination beider auf verschiedene Weise stattfinden. Indem wir die Schwingungscurven beider betrachten, können wir uns vorstellen, dass Grundton und Oberton zu gleicher Zeit mit einem Wellenberge anheben. Nach Ablauf einer Schwingungsperiode des Grundtones wiederholt sich dasselbe Spiel, d. h. es fallen wieder die Anfänge zweier Wellenberge genau zusammen, weil der Oberton immer mit einer ganzen Zahl von Schwingungen fertig ist, wenn der Grundton eine vollendet hat. Jetzt wollen wir die Phasen des Obertones, seine Wellenberge und Wellenthäler, so gegen die des Grundtones verschieben, dass der Wellenberg des Obertones immer um ein Stück später anfängt als der des Grundtones. Wird nun der Klang derselbe bleiben oder ein anderer werden?

Um uns die Sache anschaulich zu machen, wollen wir folgende von Helmholtz gegebene Fig. 88 benutzen. Aus dem Grundtone und dem ersten Obertone ist, wie wir schon abgeleitet haben, ein Klang (Fig. 86) entstanden. Nun wollen wir den Oberton soweit nach

rechts rücken, dass sein Anfang gerade mit der Ordinate $a_1$ zusammenfällt. Wir erhalten dann durch Addition der Ordinaten eine Schwingungscurve, welche wie Fig. 87 aussieht, in welcher die Wellenberge viel steiler sind, während die Thäler breit und flach aussehen. Die punktirte Curve stellt den Grundton vor.

Ebenso wie wir aus dem Grundtone und dem ersten Obertone auf diese Weise zwei verschiedene Schwingungscurven zusammengesetzt haben, könnten wir eine sehr grosse Zahl solcher erzeugen, die Uebergänge zueinander darstellten, wenn wir den Oberton um geringe Werthe immer weiter verschöben. Man sieht ein, dass die so entstehenden Wellen ihre Formen ändern müssen, und wir haben uns die Frage vorgelegt, ob sie auch ihren Klang ändern.

Zur experimentellen Entscheidung dieser Frage hat Helmholtz reine Töne angewendet, welche durch elektromagnetische Stimmgabelapparate, wie der in Fig. 85 abgebildete, erzeugt wurden. Denken wir uns zwei solche Apparate, von denen der eine den Grundton, der andere den Oberton angibt. Wenn wir nun als Grundton den Ton *B* wählen, und dazu als Oberton die Octave *b* erklingen lassen, so erhalten wir einen Klang, welcher deutlich wie ein tiefes *U* klingt.

Mit Hülfe eines Kunstgriffes gelingt es ferner, die Phasen des Obertones gegen die des Grundtones zu verschieben. Es wird nämlich die Stimmgabel *B* durch eine andere treibende Stimmgabel fortdauernd in Bewegung erhalten. Die letztere ist in Fig. 89 abgebildet. Wir sehen hier eine horizontal gestellte Stimmgabel *a*, deren Enden zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten *b b* liegen. Ein oder auch beide Enden der Stimmgabel tragen ein Platinhäkchen *c*, welches in ein Quecksilbernäpfchen *d* eintaucht.

Es wird nun ein elektrischer Strom von *d* nach *e* durch die Gabel und von dort durch die Windungen des Hufeisenmagneten zur Kette zurückgeleitet. Durch Hebung der Zinke, welche vom Magneten angezogen

wird, öffnet sich die Kette in *c*, indem der Platindraht austaucht. Die Gabel schwingt also zurück, stellt den

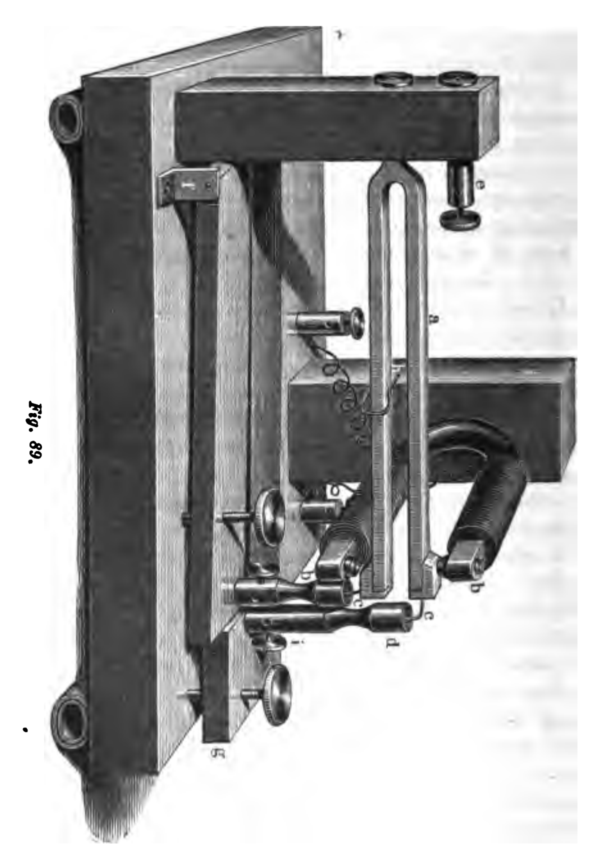


Fig. 89.

Strom wieder her, wird wieder angezogen und geräth dadurch in dauernde Schwingung.

Der Strom der treibenden Gabel wird aber ausserdem noch durch die Elektromagneten der Stimmgabel *B*

des Grundtones geleitet und versetzt diese in Mitschwingung; ausserdem geht die Leitung auch noch durch den Magneten der Stimmgabel *b*, die auch in Mitschwingung versetzt wird, weil sie immer nach je zwei Schwingungen einen magnetischen Stoss erhält. Die beiden Stimmgabeln *B* und *b* geben dann einen U ähnlichen Klang, sobald man die Klappen ihrer Resonatoren öffnet.

Bei dieser Anordnung fallen die Anfänge zweier Wellenberge des Grundtones *B* und des Obertones *b* vollständig zusammen, denn in demselben Momente, in welchem *B* einen magnetischen Stoss erhält, erhält ihn auch *b* in derselben Richtung. Sobald man aber bei der Gabel *b* die Oeffnung des Resonators etwas verengert, so verzögert sich, wie Helmholtz durch Rechnung nachgewiesen hat, der Eintritt der Phase und es findet eine Verschiebung des Obertones gegen den Grundton statt. Nichtsdestoweniger bleibt in diesen Versuchen der Klang beider Töne zusammen ein und derselbe, gleichgültig wie die Wellenberge und -thäler derselben zueinander der Zeit nach liegen.

Was geht nun aus dieser wichtigen Thatsache hervor? Wir können daraus schliessen, dass das Ohr die verschiedene Gestalt der Schallwellen nicht als Ganzes empfindet, sondern dass es dieselben in seine einfachen Bestandtheile zerlegt.

Es lässt sich diese Thatsache nur dadurch erklären, dass der Grundton ein mitschwingendes Organ in Bewegung setzt und der Oberton ein anderes, sodass die Schallschwingung sich in ihre Bestandtheile zerlegt. Diese Zerlegung wird immer in derselben Weise vor sich gehen, mögen die Phasen beider Töne noch so verschieden zueinander gelagert sein. Der Erfolg wird daher in der Reizung zweier Nervenbahnen bestehen, die auch in allen Fällen dieselben bleiben müssen, und daher immer dieselbe Empfindung im Gehör hervorrufen werden.

Die Empfindung eines Klanges besteht also darin,

dass zu der Erregung einer bestimmten Nervenbahn des Schneckennerven, die durch den Grundton erzeugt wird, mehr oder weniger eine schwächere Erregung bestimmter anderer Nervenbahnen hinzutritt, deren Enden durch die Obertöne erregt werden.

---

## Neuntes Kapitel.

Harmonie der Klänge. — Consonanz und Dissonanz. — Entstehung von Schwebungen. — Zurückführung der Dissonanz auf das Vorhandensein von Schwebungen. — Einfluss der Obertöne auf die Harmonie. — Die Combinationstöne. — Die Accorde. — Die Geräusche.

In der Musik erfreuen wir uns nicht nur des Eindrucks aufeinander folgender melodischer Töne, sondern in hohem Masse auch des wohlthuenden Zusammenklangs mehrerer Töne miteinander. Am einfachsten beurtheilen wir die daraus hervorgehende Empfindung, wenn wir nur zwei Töne zusammen erklingen lassen. Die angenehmen Zusammenklänge bezeichnet man als Consonanz und die unangenehmen als Dissonanz.

Eine Octave c und c′ erscheint uns consonant, ebenso eine Quinte c und g, auch die Terz c und e nennen wir consonant. Schlagen wir dagegen auf dem Klavier zwei nebeneinander liegende Töne wie c und d an oder gar zwei noch näher liegende Töne c und cis, so haben wir das ausgesprochene Gefühl eines unangenehmen Klanges, welches wir Dissonanz nennen. Obgleich es nun auch Dissonanzen zwischen zwei nicht nahe liegenden Tönen gibt, so wollen wir zunächst nur die nahe liegenden Töne näher untersuchen.

Wenn zwei Töne, die um ein oder ein halbes Intervall voneinander entfernt sind, eine Dissonanz geben, so muss man voraussetzen, dass das Gefühl der Disso-

nanz noch grösser werden wird, wenn man die Tonhöhen noch näher aneinander rückt. Dies bestätigt sich in der That. Mit Hülfe zweier Stimmgabeln, die wenig voneinander differiren, können wir einen solchen Zusammenklang hervorrufen, der uns als das höchste Mass eines Misklanges erscheinen wird. Dabei aber machen wir abgesehen von dem ästhetischen Eindruck eine akustische Beobachtung, die darin besteht, dass der Klang aus einzelnen Stössen sich zusammensetzt, welche immer langsamer auftreten, je näher die Tonhöhen einander sind. Man hat diese Stösse die Schwebungen genannt.

Man kann Schwebungen zweier nahe liegenden Töne an allen tonerzeugenden Instrumenten beobachten, am besten an solchen, bei denen die Tonhöhen sich leicht verändern lassen. Blasen wir z. B. zwei offene Orgelpfeifen von gleicher Höhe auf demselben Windkasten an, so können wir den Ton der einen etwas niedriger machen, wenn wir die obere Oeffnung ein wenig mit der Hand decken. Sofort treten Schwebungen auf, erst langsam, dann immer schneller werdend je mehr wir die Hand vorschieben. Werden die Schwebungen schneller, so gehen sie in ein r. ähnliches Schwirren über. Ein solches hört man auch schon auf dem Klavier, wenn man zwei tiefe Töne von einem halben Intervall anschlägt.

Wie erklären sich nun die Schwebungen, und was haben sie mit der Dissonanz zu thun? Die Schwebungen sind keine subjective Erscheinungen, sondern sind wirkliche Unterbrechungen oder Schwächungen des Tones. Sie entstehen durch Interferenz der Schallwellen.

Interferenz der Wellen nennt man das Zusammenfallen von Wellenbergen des einen Wellenzuges mit Wellenthälern des andern. Sobald dies geschieht, heben sich die Bewegungen gegenseitig auf, indem gleichsam jedes Wellenthal von einem Wellenberge ausgefüllt wird und jeder Wellenberg durch ein Wellenthal abgetragen

wird. Man kann an einer Stimmgabel solche Interferenzen beobachten, wenn man sie dicht vor das Ohr hält und langsam um ihre Längsaxe dreht. Hält man sie senkrecht und stehen Ohr und die beiden Zinken in einer geraden Linie, so erscheint der Ton am stärksten; sobald wir die Stimmgabel um 45° drehen, so wird der Ton schwächer und bei weiterm Drehen wieder stärker, sodass bei einer Umdrehung in vier symmetrisch gelegenen Richtungen der Ton geschwächt wird. Von beiden Zinken gehen hier Wellenzüge aus, die zum Theil miteinander interferiren. Die Zinken schwingen so, dass sie sich gleichzeitig beide nach innen oder nach aussen bewegen. Sie ertheilen daher der umgebenden Luft eine Bewegung in entgegengesetzter Richtung, denn wenn sie beide nach innen schwingen, werfen sie die dazwischen befindlichen Lufttheilchen einander entgegen, und wenn sie nach aussen schwingen, erhalten die Lufttheilchen auch die entgegengesetzte Richtung.

Es gibt daher eine Stellung der Zinken zum Ohre, welche oben angegeben ist, in der sich eine Interferenz der beiden Wellenzüge bemerklich macht.

Wenn wir statt zweier vollkommen gleicher Wellenzüge, zwei von ungleicher Schwingungsdauer haben, die aber einander sehr nahe liegen, so werden auch Interferenzen entstehen müssen. Wir nehmen an, dass die beiden ersten Wellenberge zu gleicher Zeit beginnen, so wird der zweite Wellenberg desjenigen Tones, der langsamere Schwingungen macht, ein wenig später anheben, der dritte noch einmal so spät, der vierte dreimal später u. s. w. Schliesslich wird der tiefere Ton um die Länge eines ganzen Wellenberges hinter dem höhern zurückgeblieben sein, und nun haben wir einen Moment, wo Wellenberg des einen mit Wellenthal des andern zusammenfällt und eine Interferenz entsteht. Doch dieser Zustand bleibt nicht bestehen, es eilen die Wellenberge des höheren Tones noch weiter voran, sodass bald wieder ein Moment kommt, in welchem die

Wellenberge miteinander zusammenfallen und der Ton sich verstärkt. Die Folge davon ist, dass abwechselnd der Ton anschwillt und schwächer wird.

Je näher die Töne aneinander liegen, desto langsamer sind die Schwebungen, weil es länger dauert bis der höhere Ton dem tiefern um einen ganzen Wellenberg vorangeschritten ist, je grösser das Intervall um so schneller, und bei einem gewissen Abstande beider Töne müssen die Schwebungen unserm Ohre entschwinden.

Die Ursache der Dissonanz ist nun von Helmholtz auf das Vorhandensein der Schwebungen zurückgeführt worden. Das schnelle Schwanken in der Tonstärke, welches durch die Schwebungen hervorgerufen wird, macht auf unser Ohr einen unangenehmen Eindruck, ähnlich wie ein flackerndes Licht unserm Auge höchst lästig ist. Wenn die beiden Töne einander sehr nahe sind, sind wir uns der Ursache der unangenehmen Empfindung bewusst, weil wir die Schwebungen einzeln wahrnehmen. Aber bei dem Intervall eines halben oder ganzen Tones, wo wir die Schwebungen nicht mehr einzeln empfinden, macht sich ihre Anwesenheit durch das continuirliche Gefühl der Dissonanz geltend. Der Klang besitzt nach der Bezeichnung von Helmholtz einen gewissen Grad von Rauhigkeit, welcher durch die Schwebungen erzeugt wird.

Das Unangenehme dieser Empfindung lässt sich auf eine allgemeine Wahrnehmung in dem Gebiete der Nerventhätigkeit zurückführen. Jede intermittirende Reizung eines sensibeln Nerven ermüdet stärker als die continuirliche. Das Flackern eines Lichtes ist deshalb so unangenehm, weil zwischen zwei Lichtreizen die Netzhaut an Empfindlichkeit zunimmt und von jedem Reize in hohem Grade afficirt wird. Ist dagegen das Licht continuirlich, so stumpft sich die Netzhaut allmählich ab und wird auf die Dauer weniger gereizt. Wenn wir aus der Dunkelheit ins Helle treten, so sind wir im ersten Moment geblendet, weil in diesem die

Reizung eine sehr starke ist, und mit allmählicher Abnahme der Reizung gewöhnt sich das Auge an das Licht. Das Flackern ist daher gleichsam ein schnell wiederholtes Eintreten aus dem Dunkeln ins Helle und reizt daher das Auge sehr stark.

Aehnlich scheint sich das Ohr oder vielmehr der Gehörnerv zu verhalten. Die Dissonanz ist ein discontinuirlicher Klang, welcher den Gehörnerven in unangenehmem Grade reizt. Feingebildete musikalische Ohren empfinden diesen Reiz in erhöhtem Grade, wie dem Auge des gebildetern und sensiblern Menschen das Flackern eines Lichtes viel unangenehmer ist als dem Ungebildeten.

Durch den Vergleich der Farben und Töne miteinander im gewöhnlichen Sprachgebrauch ist man auch dahin geleitet worden, von einer Harmonie der Farben zu sprechen, und hat daher die unharmonische Farbenzusammenstellung der Dissonanz verglichen. Vom naturwissenschaftlichen Standpunkt aus hat dieser Vergleich vieles Mangelhafte. Zwei unharmonische Farben wie grün und blau sind uns deshalb nebeneinander unangenehm, weil sie sich gegenseitig nicht heben, sondern abschwächen, indem sie beide ein und dieselbe Gattung farbenempfindender Fasern stark erregen und daher ermüden, während Gelb und Blau uns harmonisch erscheinen, weil die gelbempfindenden Fasern sich ausruhen, wenn Blau betrachtet wird und umgekehrt. Der gemeinsame physiologische Vergleichspunkt zwischen unharmonischen Tönen und Farben liegt also nur in der Ermüdung der Sinnesnerven, die aber auf verschiedene Weise zu Stande kommt, beim Hörnerven durch discontinuirliche Erregung, beim Sehnerven durch Inanspruchnahme einer bestimmten Fasergattung.

Die Anzahl der Schwebungen zwischen zwei Tönen lässt sich aus der Schwingungszahl derselben bestimmen. Wenn der höhere Ton in der Secunde eine Schwingung mehr macht als der tiefere, so wird es in dieser Zeit nur einmal vorkommen, dass Wellenberg und

Wellenthal zusammenfallen, ist ihre Differenz zwei, so wird es zweimal vorkommen u. s. w. Kurzum, die Zahl der Schwebungen in einer Secunde ist gleich der Differenz der Schwingungszahlen.

Bei einer gewissen Zahl von Schwebungen hat das Gefühl der Dissonanz sein Maximum. Langsame Schwebungen zwischen zwei sehr naheliegenden Tönen, die wir als einzelne Stösse wahrnehmen, sind uns nicht so unangenehm als die schnellern Schwebungen zweier Töne von dem Intervall einer Secunde oder halben Secunde. Zwischen dem Tone h′ von 495 Schwingungen und der folgenden halben Secunde c″ von 528 Schwingungen finden beim Zusammenklang 528 — 495 = 33 Schwebungen statt, die Dissonanz ist hier eine sehr starke und erreicht in dieser Höhe der Tonscala ihr Maximum. Schlagen wir dagegen die tiefen Töne H und C an, welche 62 und 66 Schwingungen machen, so nehmen wir deutlich vier Schwebungen in der Zeit-Secunde wahr, und das Gefühl der Dissonanz ist viel geringer. Daher sind die Dissonanzen in tiefen Tonlagen nicht so hervortretend als in mittlern. Auch nach der Höhe hin nimmt das Gefühl der Dissonanz bei gleichem Intervall wieder etwas ab, sodass bei ungefähr 30 Schwebungen in der Secunde das Maximum der Dissonanz liegt.

Bisher haben wir uns darauf beschränkt, die Dissonanz zweier naheliegender Töne auf Schwebungen zurückzuführen. Eine Secunde c—d, noch mehr die halbe Secunde c—cis sind ausgesprochene Dissonanzen, doch schon die kleine Terz c—es ist unserm Ohre nicht mehr unangenehm und stellt den Uebergang zu den Consonanzen dar.

Nun machen wir aber die Bemerkung, dass auch zwei sehr entfernt voneinander liegende Töne ausgesprochene Dissonanzen geben. Die Septime c—h ist eine ganz entschiedene Dissonanz, beinahe ebenso stark wie die halbe Secunde h—c′. Die Schwebungen zwischen c und h können nicht mehr die Ursache dieser starken Dissonanz sein, denn ihre Zahl ist bereits 115 in der

Secunde. Wir müssen also nach einer andern Ursache der Erscheinung suchen.

Wenn wir nämlich bedenken, dass zu dem Grundton eines Klanges immer noch eine Reihe von Obertönen gehören, so liegt die Vermuthung sehr nahe, dass auch die Obertöne im Stande sein werden, Schwebungen zu erzeugen, und dass auch diese auf den Zusammenklang zweier Töne von Einfluss sein müssen. In der That ist bei der Septime c—h die Einwirkung des ersten Obertons von c, die höhere Octave c′, ersichtlich, denn zwischen h und c′ erreicht die Rauhigkeit der Schwebungen ihr Maximum. Wir müssen daher bei zwei zusammenklingenden Tönen noch berücksichtigen, wie die Obertöne des tiefern zum höhern Tone liegen, aber ausserdem müssen wir noch berücksichtigen, wie die folgenden Obertöne des tiefern Tones zu den Obertönen des höhern Tones gelegen sind.

Fallen die Obertöne beider Töne zusammen, so werden wir eine vollkommene Consonanz haben. Dies ist bei der Octave wirklich der Fall, wie folgendes Beispiel zeigt:

| Grundton: | Obertöne: | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| c | c′ | g′ | c″ | e″ | g″ | b″ | c‴ |
| | c′ | | c″ | | g″ | | c‴ |

Links vor dem senkrechten Strich stehen die beiden Grundtöne c und c′, dahinter folgen ihre nächsten Obertöne. Man sieht, dass jeder Oberton von c′ mit einem Oberton von c zusammenfällt, und daher gibt es hier gar keine Veranlassung zu Schwebungen. Die Octave ist die vollkommenste Consonanz.

Aehnlich verhält sich auch die Duodecime c g′, die man auch eine vollkommene Consonanz nennt, wie die entsprechende Tabelle zeigt:

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| c | c′ | g′ | c″ | e″ | g″ | b″ | c‴ | d‴ |
| | | g′ | | | g″ | | | d‴ |

Der erste Oberton von g' fällt mit dem fünften von c, der zweite mit dem achten zusammen. Je höher die Obertöne werden, um so weniger ist das Auseinanderfallen derselben von Bedeutung, weil sie mit der Höhe an Stärke abnehmen. Wenn aber die ersten und zweiten Obertöne nicht mehr zusammenfallen, so kommt es allerdings wesentlich darauf an, ob sie zusammen eine Dissonanz geben oder nicht. Denn diese Dissonanz ist es, welche sie dem ganzen Klange mittheilen.

Wenn wir daher zur Analyse der Quinte c g übergehen, so werden wir wahrnehmen, dass ihre Consonanz nicht mehr so vollkommen ist als die der Octave. Denn die Tabelle zeigt uns folgende Reihen von Obertönen:

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| c | c' | g' | c'' | | e'' | g'' | . . . . |
| g | | g' | | d'' | | g'' | . . . . |

Hier bemerken wir, dass der erste wie dritte Oberton von g auf entsprechende von c fallen, der zweite dagegen d'' fällt zwischen c'' und e'' und muss mit diesen eine Dissonanz geben. Aber da es sich um den zweiten und dritten Oberton handelt, die an Stärke schon sehr zurücktreten, so behält der ganze Klang den Charakter der Consonanz, jedoch mit einer Spur von Rauhigkeit, wodurch das Eigenthümliche des Quintenklangs entsteht.

Die Quarte c—f zeigt uns folgende Verhältnisse:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| c | c' | | g' | c'' | e'' | g'' |
| f | | f' | | c'' | f'' | a'' |

Es fällt, wie wir sehen, schon der erste Oberton f' von f nicht mehr mit einem von c zusammen, sondern muss mit g' eine Dissonanz geben. Die Obertöne c'' fallen dagegen zusammen, die spätern nicht. Die Quarte ist daher keine so gute Consonanz mehr als die Quinte, erscheint aber dem Ohre doch immer noch angenehm.

Auch die grosse Terz c—e erscheint dem Ohre als eine Consonanz, aber der Grad der Consonanz ist geringer als der der Quart, wie die folgende Tabelle lehrt:

| c | c′ | | g′ | c″ | e″ | . . . |
|---|---|---|---|---|---|---|
| e | | e′ | | h′ | e″ | . . . |

Erst der dritte Oberton von e fällt mit dem vierten von c zusammen. Der zweite h′ bildet mit c″ eine sehr starke Dissonanz. Der erste Oberton e′ bildet mit c′ und g′ keine entschiedene Dissonanz.

Aehnlich wie die grosse Terz verhält sich auch die grosse Sexte c—a, wie man sich leicht construiren kann. Sie besitzt ungefähr denselben Grad von Consonanz wie jene.

Die kleine Terz stellt bereits den Uebergang zur Dissonanz dar, weil zwischen den Grundtönen z. B. c und es die Zahl der Schwebungen schon beginnt sich dem Ohre bemerklich zu machen. Trotzdem können wir sie noch als eine unvollkommene Consonanz bezeichnen, weil der Grad der Rauhigkeit, den sie erzeugt, dem Ohre noch nicht unangenehm ist.

Aehnlich der kleinen Terz ist auch die kleine Sexte eine unvollkommene Consonanz.

Im Uebrigen ist es nicht möglich, zwischen Consonanz und Dissonanz eine scharfe d. h. absolute Grenze festzustellen. Es ist vielmehr Sache des musikalischen Geschmacks, welcher der Veränderung unterworfen ist, wohin wir die Grenze verlegen. So haben die alten Griechen und Römer die Terz für eine Dissonanz gehalten und im Gesange vermieden, wahrscheinlich weil nach der Ansicht von Helmholtz ihr Ohr für Schwebungen empfindlicher war als das unsere und weil bei tiefen Männerstimmen die Terz sich dem Maximum der Rauhigkeit mehr nähert als in den mittlern Tonlagen unserer Instrumente. Erst mit der Entwickelung der mehrstimmigen Instrumentalmusik im Mittelalter ist die

Terz als unvollkommene Consonanz zugelassen worden. Die Septime z. B. c—h ist, wie wir schon oben erläutert haben, eine entschiedene Dissonanz, weil der erste Oberton von c nur um einen halben Ton von h differirt. Der erste Oberton ist aber immer von merklichem Einfluss auf den Gesammtklang.

Von Helmholtz ist eine Figur construirt worden, welche den Grad der Rauhigkeit für die Intervalle anschaulich macht, indem das Maximum derselben bei 33 Schwebungen in der Secunde angenommen wurde. In Fig. 90 stellt die horizontale Linie c′ c″ die Tonscala zwischen dem ein- und zweigestrichenen c vor und man denke sich, dass jeder Ton derselben mit dem Grundton c′ zusammenklingt. Die Rauhigkeit, welche diese Töne und ihre Obertöne unter sich erzeugen, sind überall als Berge aufgetragen, sodass die Höhe den Grad der Dissonanz angibt, die Consonanzen aber in den Thälern liegen. Die dabei stehenden Zahlen geben an, zwischen welchen Obertönen die Rauhigkeiten stattfinden, wobei der Grundton mit 1, die Obertöne mit fortlaufenden Zahlen bezeichnet sind. Die Octave c″ fällt in das tiefste Thal zum Zeichen der vollkommensten Consonanz, die Rauhigkeit ist Null. Klingt die Quinte g′ mit c′ zusammen, so ist auch die Rauhigkeit fast Null. Für die Quarte f′ ist das Thal nicht mehr so tief und steigt mit der Terz e und der kleinen Terz es noch mehr an. Die Maxima der Dissonanzen liegen in der Nähe von c′ und c″.

Beim Zusammenklingen zweier Töne hat man ferner die Entstehung neuer Töne beobachtet, welche man die Combinationstöne nennt. Der tiefere Combinationston ist seit langer Zeit bekannt, die Zahl seiner Schwingungen ist gleich der Differenz der beiden Töne, wesshalb er der Differenzton genannt wird. Für die Quinte z. B. ist der Differenzton die tiefere Octave, sodass wenn z. B. c′—g′ erklingt, das tiefere c als Differenzton hinzukommt; denn die Schwingungen

von c' : g' verhalten sich wie 2 : 3 und die Differenz 3 — 2 = 1 ist das Schwingungsverhältniss für c.

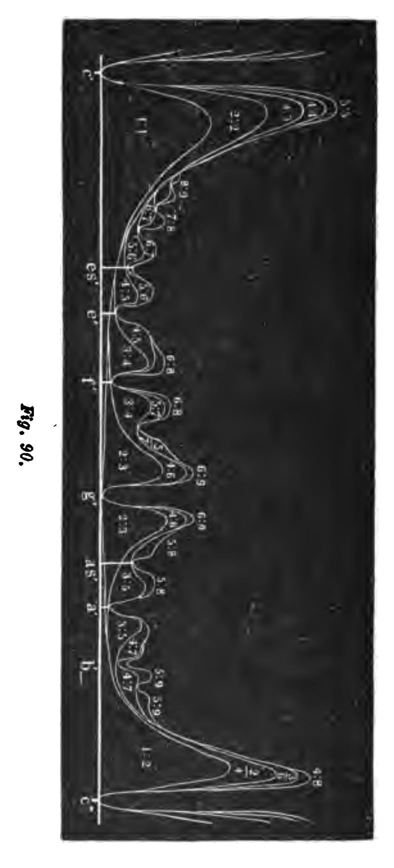



Fig. 90.

Ausser dem Differenzton hat Helmholtz noch einen viel schwächern Summationston nachgewiesen, dessen Schwingungen aus der Summe der beiden Töne entstehen. Mit Hülfe der Resonatoren kann man beide

Töne leicht heraushören, ein Beweis dafür, dass sie nicht etwa, wie man früher geglaubt hat, erst im Ohre entstehen, sondern schon in der Luft vorhanden sind. Die Entstehung dieser Töne ist von Helmholtz mit Hülfe der mathematischen Analyse darauf zurückgeführt worden, dass die Schwingungen der tönenden Körper und der Luft nur annähernd dem Pendelgesetze folgen und dass die Abweichungen um so grösser sind, je grösser die Amplituden werden. Stark anhaltende Klänge, wie die einer Orgel, geben daher starke Combinationstöne.

Auch die Combinationstöne können Veranlassung zu Schwebungen geben, und zwar hauptsächlich dadurch, dass der erste Oberton auch im Stande ist, zur Erzeugung von Combinationstönen beizutragen. Dies ist aber nur dann der Fall, wenn die Intervalle, was häufig vorkommt, um ein Minimum von ihren richtigen Schwingungsverhältnissen abweichen. Wenn wir z. B. eine Quinte haben, deren Schwingungszahlen sich wie 200 : 300 verhalten mögen, so werden die ersten Obertöne 400 und 600 Schwingungen machen. Die Quinte selbst gibt einen Differenzton von 300 — 200 = 100 Schwingungen, der Oberton von 400 Schwingungen gibt mit dem Ton von 300 Schwingungen ebenfalls einen Differenzton von 100 Schwingungen. Beide Differenztöne fallen zusammen, geben also keine Veranlassung zu Schwebungen. Wenn aber die Stimmung der Quinte um ein wenig abweicht, sodass die Zahlen sich z. B. wie 200 : 301 verhielten, so hätte ihr Differenzton 101 Schwingungen. Der eine der Obertöne von 400 Schwingungen würde nun mit dem Ton von 301 Schwingungen einen Differenzton von 99 Schwingungen geben, und die beiden Differenztöne von 101 und 99 Schwingungen würden alsdann Schwebungen erzeugen.

Im ganzen sind aber die Schwebungen durch Combinationstöne für Dissonanz und Consonanz von geringerer Bedeutung als die Obertöne, weil jene Töne

überhaupt eine verhältnissmässig sehr geringe Stärke besitzen.

In der mehrstimmigen Vocal- und Instrumentalmusik handelt es sich nicht nur um das Zusammenklingen zweier, sondern auch um das mehrerer Töne miteinander, welches man im allgemeinen Accord nennt. Auch in diesem Falle kommt es wesentlich darauf an, dass die Töne miteinander keine Schwebungen erzeugen, und wenn je zwei Töne miteinander consonant sind, so ist auch der Accord aller Töne zusammen ein consonanter. Daher ist z. B. der bekannte Dreiklang C E G ein wohlklingender Accord, ebenso eine Anzahl anderer Accorde, welche wir aus der musikalischen Erfahrung kennen gelernt haben.

Man unterscheidet in der Musik seit langer Zeit die Duraccorde und die Mollaccorde. Für die erstern bildet der Dreiklang C E G den Grundaccord, für die letztern der Dreiklang C Es G. Beide klingen unserm Ohre durchaus verschieden, obwol ihre Intervalle dieselben sind und nur ihre Lage gegeneinander vertauschen. Denn in C E G folgt auf die grosse Terz C E die kleine E G, und in C Es G folgt auf die kleine C Es die grosse Terz Es G. Der Unterschied des Klanges lässt sich schwer beschreiben, ist aber jedem Ohr unmittelbar von selbst gegeben, und lässt sich ungefähr dahin bezeichnen, dass der Duraccord etwas Klares, Bestimmtes, Abgeschlossenes an sich trägt, sodass er das Gefühl der Befriedigung zu erwecken vermag, während der Mollaccord den Charakter des Unklaren und Verhüllten besitzt, wodurch er zum Ausdruck einer trüben Stimmung geeignet erscheint. Die akustische Ursache dieses Unterschieds liegt, wie Helmholtz nachgewiesen hat, in dem Verhalten, welches die Combinationstöne der Accorde zueinander einhalten. In dem Duraccord sind die entstehenden Combinationstöne einander consonant in dem Mollaccord dagegen geben die Combinationstöne eine Dissonanz, und erzeugen dadurch etwas dem Accordklange

Fremdartiges und Widersprechendes, was den eigenthümlichen Charakter des Unklaren hervorzurufen scheint. —

Ganz verschiedenartig von der musikalischen Gehörsempfindung ist die Empfindung, welche wir Geräusch nennen. Das Geräusch entsteht durch unregelmässige, nichtperiodische Bewegungen der schallleitenden Körper. Wenn wir zwei feste Körper gegeneinander reiben, so entsteht ein charakteristisches Geräusch dadurch dass Stösse der Oberflächen gegeneinander stattfinden, welche aber nicht in denselben Zeitintervallen aufeinander folgen, und die Luft in unregelmässige Schwingungen versetzen. Je rauher die Oberflächen sind, desto stärker werden die Stösse sein, je glatter um so schwächer. Die mitschwingenden Apparate in unserm Ohr, das Trommelfell, die Gehörknöchelchen, das Labyrinthwasser machen diese unregelmässigen Bewegungen mit und leiten sie dem Hörnerven zu. Wo aber wird diese Bewegung auf den Gehörnerven übertragen?

Es ist nicht sehr wahrscheinlich, dass die Schnecke mit ihren zahlreichen feinen mitschwingenden Apparaten, welche auf Töne von bestimmter Höhe abgestimmt zu sein scheinen, die Aufgabe habe, unregelmässige Schallbewegungen aufzunehmen. Denn ein abgestimmter elastischer Körper wird nur durch Töne in Mitbewegung versetzt werden können, welche seinem Eigenton nahe kommen. Wenn also auch selbst das Labyrinthwasser in der Schnecke in unregelmässige Bewegung geräth, so werden doch die empfindlichen Organe der Schnecke verhältnissmässig wenig aus ihrer Ruhelage gebracht werden. Dagegen existiren in dem Vorhofssäckchen Gebilde, denen wir eine unregelmässige Mitbewegung sehr wohl zuschreiben können, nämlich den Gehörsteinchen, welche hier der häutigen Wandung dicht anliegen. Diese kleinen Kryställchen, die ausserordentlich leicht beweglich sind, können sich nicht wie elastische Körper verhalten, können keine Eigenschwingung besitzen, und werden daher jede noch so unregel-

mässige Bewegung der Flüssigkeit leicht mitmachen. Die in der Wandung befindlichen Nerven, welche durch die Gehörsteinchen gereizt werden, sind daher sehr wahrscheinlich die Vermittler, welche uns die Geräusche wahrnehmbar machen.

Wenn wir demnach die berechtigte Annahme machen dürfen, dass Töne und Geräusche durch verschiedene Nerven aufgefasst werden, so bleibt es doch noch ganz räthselhaft, woher den Nerven solche verschiedenartige Eigenschaft zukommt. Wir müssen hier an ähnliche Erscheinungen im Gebiete der Sinnesnerven denken, an die specifische Energie des Sehnerven, nur Lichtempfindung zu erzeugen, an die des Hörnerven nur Gehörsempfindungen hervorzurufen, und dass es hiermit im Zusammenhange stehe, wenn wir innerhalb der Sphäre einer Sinnesempfindung verschiedenartige Qualitäten derselben vorfinden.

Schliesslich machen wir noch die Bemerkung, dass wir nach unserer täglichen Erfahrung auch Geräusche voneinander unterscheiden. Wir bezeichnen sie hiernach als reibendes, knarrendes, zischendes Geräusch. Diese Charaktere hängen zum Theil von der Stärke der einzelnen Stösse ab, und von der Schnelligkeit mit welcher sie einander folgen, zum Theil aber auch davon, dass sich dem Geräusch wirkliche Töne von wechselnder Höhe beimengen. Mit einem Reibegeräusch pflegen oft tiefere Töne verbunden zu sein, in einem zischenden Geräusch liegen meist sehr hohe Töne, welche ihm den eignen Charakter geben. Durch solche Beimengungen von Tönen sind wir denn oft im Stande die Ursache des Geräusches zu erkennen.

---

# VIERTER ABSCHNITT.

## Geruch und Geschmack.

### Erstes Kapitel.

#### Der Geruchssinn.

Gewisse Substanzen, welche in gasförmiger Gestalt mit der Luft in die Nasenhöhle eingesogen werden können, erregen eine Geruchsempfindung. Die riechenden Substanzen kommen hier mit dem Sinnesorgan in directe Berührung, ähnlich wie dies beim Schmecken der Fall ist, und üben auf dasselbe einen directen Reiz aus, dessen Folge eine ganz specifische Sinnesempfindung ist. Es wäre nicht möglich, die Geruchsempfindung durch die übrigen Sinnesempfindungen umschreiben zu wollen, etwa als eine Art Gefühl oder Geschmack, sie ist vielmehr den übrigen so fremdartig als es Sehen und Hören einander sind, eine Empfindung ganz eigner Art.

Dem Geruchssinn dient desshalb auch ein besonderer Nerv, der Riechnerv, welcher sich durch Ursprung, Lage und Ausbreitung von den übrigen Nerven unterscheidet. Er entspringt aus dem vordersten Lappen des Gehirnes mit einer kolbenförmigen Anschwellung, dem Riechlappen, welcher bei niedern Thieren eine sehr starke Entwickelung besitzt. Seine Fasern breiten

sich an der Basis des Schädels aus und dringen durch die siebförmige Platte des Siebbeines, welche zwischen den knöchernen Decken beider Augenhöhlen eingekeilt liegt, durch eine grosse Anzahl kleiner Löcher hindurch in den obern Abschnitt der Nasenhöhle. Dieselbe besteht aus drei muschelförmig gestalteten Gängen, welche mit einer Schleimhaut ausgekleidet sind.

Der untere und zum Theil der mittlere Nasengang dienen hauptsächlich zum Durchzuge der ein- und ausgeathmeten Luft und haben deshalb den Namen respiratorische Region (*regio respiratoria*) erhalten. Er ist, wie die übrigen Luftwege in der Luftröhre und der Lunge mit cylinderförmigen Zellen (Epithelzellen) bedeckt, welche dicht nebeneinander stehend an ihrer freien Oberfläche feine Flimmerhärchen tragen, deren peitschenförmige Bewegungen die Aufgabe haben, Schleim und Staub nach aussen zu befördern.

Der obere und zum Theil der mittlere Nasengang tragen das Sinnesorgan für die Geruchsempfindungen und haben desshalb den Namen Riechgegend (*regio olfactoria*) erhalten. Sie unterscheidet sich durch ihre gelbe Farbe, die durch Pigment erzeugt wird, von der Athemregion, und ist nicht wie diese mit flimmernden Epithelzellen bedeckt, sondern trägt andersgestaltete Organe an ihrer Oberfläche.

Erst in neuerer Zeit ist es von Max Schultze genauer untersucht worden, auf welche Weise der Riechnerv in der Nasenschleimhaut endet. Nach Analogie der übrigen Sinnesorgane musste man erwarten, dass die letzten Nervenfasern mit besondern Endorganen ausgestattet sind, welche zur Aufnahme von Sinneseindrücken befähigt sind.

Die Riechschleimhaut ist auch von cylinderförmigen Epithelzellen bedeckt, wie wir sie in Fig. 91 *e* abgebildet sehen. Der Oberfläche (*o*) wenden sie ihr breites Ende zu, nach unten hin laufen ihre Fortsätze schmal aus und verbinden sich mit dem darunterliegenden Gewebe. Zwischen ihnen befinden sich lange Stäbchen (*s*),

welche nach unten hin eine Erweiterung von der Form eines Zellkernes tragen und sich von diesem mit einem feinen Faden nach unten hin fortsetzen. Da dieser Faden den Charakter von feinsten Nervenfäden zeigt und sich in der Gegend verliert wo die feinsten Fäden des Riechnerven enden, so ist es sehr wahrscheinlich, dass er mit dem Riechnerven zusammenhängt. Diese Gebilde sind von M. Schultze die Riechzellen genannt worden. Bei einzelnen Thieren, von denen man sehr frische Präparate gewinnen kann, hat man auch sehr kleine feine Härchen auf dem Ende der Stäbchen aufsitzen sehen.

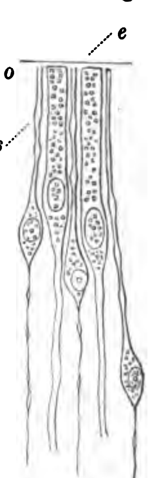


*Fig. 91.*

Die riechbaren Stoffe, welche mit der eingeathmeten Luft zur Riechschleimhaut gelangen, wirken hier offenbar auf die Endapparate des Riechnerven, nehmen wir an auf die Riechzellen ein, nicht etwa direct auf die Nervenfasern, die höchst wahrscheinlich durch die meisten riechbaren Stoffe gar nicht gereizt werden könnten, wenigstens nicht in gasförmiger Verdünnung. Wir erinnern uns daran, dass ebenso wenig die Sehnervenfasern durch Lichtwellen oder die Hörnervenfasern durch Schallwellen afficirt werden, und werden den analogen Schluss gerechtfertigt finden.

Wir müssen daher vermuthen, dass der Riechnerv nicht das Geringste von Wohlgeruch merken würde, wenn wir seine Aeste, etwa da wo sie durch das Siebbein hindurchgetreten sind, in eine Atmosphäre von Eau-de-Cologne bringen könnten, und dass er uns ebenso wenig einen üblen Geruch melden würde, wenn wir ihn in eine Atmosphäre von Schwefelwasserstoff tauchten. Die Einwirkung der riechbaren Stoffe besteht vielmehr darin, dass sie in den Endapparaten auf der Schleimhaut eine Veränderung erzeugen, und dass von den Endapparaten aus die

daselbst endigenden Nervenfasern in Erregung versetzt werden. Nur diese Endapparate, nicht aber die Nervenfasern besitzen die Fähigkeit, durch die riechbaren Stoffe einen Eindruck zu empfangen, und die Nervenfasern sind auch hier, wie überall im Körper, nichts weiter als die Fortleiter einer Depesche, welche dem Gehirn eine stattgefundene Erregung ankündigt.

Die Substanzen, welche wir durch Geruch wahrnehmen, müssen in gasförmiger Gestalt mit der geathmeten Luft der Riechschleimhaut zugeführt werden und da alle Gase und Dämpfe mehr oder weniger in Wasser löslich sind, so werden diese in kleinen Mengen in die Feuchtigkeit der Schleimhaut eindringen. Ihre Einwirkung auf die hier befindlichen Endorgane des Riechnerven ist höchst wahrscheinlich chemischer Natur, da sich der Geruch der Substanzen mit ihrer chemischen Zusammensetzung ändert. Aber es kommt noch eine mechanische Bedingung hinzu, ohne welche wir keinen Geruch wahrnehmen, nämlich die, dass ein beständiger Luftzug durch die Nase hindurch stattfindet, indem wir die Luft durch Athmung darin erneuern. Halten wir dagegen den Athem an, so hört jede Geruchsempfindung auf, selbst wenn wir uns innerhalb einer stark riechenden Atmosphäre befinden. Wir nehmen ferner den Geruch am stärksten im ersten Moment des Lufteinziehens wahr, und thun dies daher schnell hintereinander, wenn wir einen feinen Geruch merken wollen. Das kommt daher, dass unsere Nerven hauptsächlich durch plötzliche Aenderungen ihres Zustandes erregt werden, nicht aber durch dauernde Zustände, wie z. B. durch Unterbrechungen eines elektrischen Stromes, nicht aber durch den constanten elektrischen Strom. Darauf lässt es sich wol zurückführen, dass die oft wiederholte Lufterneuernng in der Nase besonders günstig für die Wahrnehmung von Gerüchen ist, und dass die Empfindung sich abstumpft, wenn die Luft darin stagnirt. Dazu kommt aber noch, dass die

Strömung der Luft eine grössere Menge der Substanzen mit der Riechschleimhaut in Berührung bringt.

Die Menge einer Substanz, welche wir durch Geruch zu erkennen vermögen, kann erstaunlich klein sein. Von einem Tropfen Rosenöl braucht nur eine Spur in Dampfform zu entweichen, um in unserer Nase den Eindruck des Wohlgeruchs hervorzurufen. Vom Moschus genügt die kleinste Menge, um den Kleidern auf jahrelang den charakteristischen Geruch zu verleihen, der dieser Substanz zukommt, ohne dass er durch den stärksten Luftstrom daraus entfernt werden könnte und Valentin hat ungefähr berechnet, dass wir noch ein Zweimilliontel eines Milligramms davon wahrnehmen können. Die Empfindlichkeit unseres Geruchssinnes übertrifft daher alle übrigen Sinne verhältnissmässig in hohem Grade. Die geringe Menge einer Substanz, welche wir durch den Geruch wahrnehmen, würden wir sicherlich nicht durch den Geschmack erkennen, wir würden sie, selbst wenn sie fest wären, niemals fühlen können, wir würden sie, vom stärksten Sonnenlichte beleuchtet, nicht sehen können. Auch kein chemisches Reagens dürfte im Stande sein, so geringe Menge von Substanzen nachzuweisen, als wir es mit dem Geruch vermögen und selbst die Spektralanalyse, welche Milliontel Gramme erkennen lässt, bleibt hinter der Empfindlichkeit unseres Geruchsorganes weit zurück.

Noch erstaunlicher als beim Menschen ist die ausserordentliche Entwickelung des Geruchssinnes bei Thieren, bei denen dieser Sinn überhaupt eine grössere Rolle spielt. Jagdhunde erkennen durch den Geruch die Spur eines Wildes, welche für das Auge absolut unmerklich sein würde. Ihr Geruchsvermögen wird aber an Feinheit noch weit übertroffen von dem des Wildes, welches im Stande ist bei günstiger Windrichtung den Jäger meilenweit zu wittern. — Wie gross mag die Menge der flüchtigen Substanzen sein, die in so grosser Entfernung von den Thieren noch wahrgenommen werden? — Ihre Kleinheit spottet jeder Schätzung.

Ob die im Wasser lebenden Thiere auch ein Geruchsvermögen besitzen? — Wenn wir nach der Entwickelung der Geruchsorgane schliessen können, so müssen wir diese Frage entschieden bejahen. Denn die Fische haben einen stark entwickelten Geruchsnerven, der aus dem vordersten Theil des Gehirns, dem Riechlappen, entspringt und der sich in der Schleimhaut von sogenannten Nasensäcken ausbreitet, die auf der Kopfhaut ausmünden. Bei diesen Thieren wirken die Substanzen nur in flüssiger Form auf die Endorgane des Geruchsnerven ein, nicht in gasförmiger Gestalt; und vielleicht ist hier der Vorgang demjenigen ähnlicher, welcher bei der Geschmacksempfindung stattfindet, die auch nur durch Flüssigkeiten hervorgerufen werden kann. Jedenfalls wird das Riechen der Wasserthiere mit dem der Luftthiere nicht ganz übereinstimmen. Es ist daher nicht wahrscheinlich, dass der Mensch im Stande sein würde unter Wasser zu riechen, wenn er ohne Gefahr einen Wasserstrom durch die Nase einziehen könnte. Wenigstens spricht ein interessanter von E. H. Weber angestellter Versuch dagegen. Derselbe füllte sich die Nasenhöhle vollständig mit Wasser, das stark mit Eau-de-Cologne versetzt war. Es gelingt dies ohne Gefahr sehr gut, wenn man bei horizontaler Lage des Körpers den Kopf senkrecht nach hinten herabhängen lässt, so dass die Nasenlöcher nach oben sehen. Das Gaumensegel schliesst dann die Nasenhöhle von der Mundhöhle vollständig ab, und es kann kein Wasser ausfliessen. Solange sich das Wasser in der Nase befand, hatte Weber nicht die Spur einer Geruchsempfindung, während sie beim Einfliessen vorhanden war. Er bemerkte ferner, dass nach dem Ausfliessen des Wassers jede Geruchsempfindung auf einige Minuten aufgehoben war, was auch bei Anwendung reinen Wassers geschah. Es scheint also, dass für das menschliche Geruchsorgan das Wasser kein geeignetes Medium ist.

Bei allen andern Sinnesorganen haben wir die Empfindungen in bestimmte Qualitäten eintheilen können.

Die Geruchsempfindungen dagegen sind so mannichfaltig, dass eine Ordnung derselben kaum möglich ist. Im allgemeinen können wir Gerüche unterscheiden, die uns angenehm sind, Wohlgerüche, und solche, die uns unangenehm sind, übele Gerüche. Wohlgeruch besitzen besonders einige Aetherarten und ätherische Oele, die in manchen Pflanzen enthalten sind, und daher zur Bereitung wohlriechender Essenzen, wie Eau-de-Cologne u. dgl. benutzt werden. Die wohlriechenden Substanzen selbst aber besitzen einen deutlich verschiedenen Geruch, der nicht weiter zu definiren ist. Zuweilen haftet ihm bei stärkerer Concentration etwas Strenges und Betäubendes an.

Den entschiedenen Gegensatz zu diesen Substanzen bilden die übelriechenden, zu welchen namentlich einige einfach zusammengesetzte Gase und Dämpfe gehören. Ein Repräsentant dieser Gattung ist das Schwefelwasserstoffgas, ferner Phosphorwasserstoff, Arsenwasserstoff, Schwefelkohlenstoff und eine Anzahl von flüchtigen Kohlenwasserstoffen. Auch eine grosse Menge von zusammengesetzten organischen Verbindungen besitzen einen entschiedenen übeln Geruch. Dazu gehören vor allen Dingen solche Substanzen, welche sich aus thierischen Resten durch Fäulniss entwickeln.

Es ist eine sehr merkwürdige Harmonie der Organisation, dass alle übelriechenden Substanzen auch dem Körper meist schädlich sind. Die übelriechenden Gase, wie Schwefelwasserstoff oder andere sind sogar starke Gifte, die in gewissen Mengen tödtlich wirken. Speisen, welche in Fäulniss übergegangen sind, und die nicht nur unser Geruch, sondern auch der Geschmack zurückweist, können heftige Krankheiten erzeugen, wenn sie genossen werden. Das Geruchsorgan ist daher ein sehr wachsamer Hüter des Organismus, welcher den Eintritt von Schädlichkeiten abhält. Doch nicht alle schädlichen Stoffe verrathen sich durch den Geruch, so z. B. das heimtückische, geruchlose Kohlen-

oxydgas, welches infolge menschlicher Unvorsichtigkeit schon manche Opfer gefordert hat.

Viele schädliche Substanzen haben gerade nicht einen übeln, aber doch einen wenigstens in grössern Mengen unangenehmen Geruch, wie z. B. Chlorgas, Brom und Jod, ferner Ammoniakgas. Bei diesen haben wir aber, ausser der Einwirkung auf den Geruchssinn, auch noch eine allgemeine Reizung der ganzen Nasenschleimhaut zu constatiren, welche mit sensibeln Nervenfasern aus dem dreigetheilten Nerven (*N. trigeminus*) reichlich versehen ist. Wenn wir z. B. Ammoniak riechen, so rührt die stechende, beissende Empfindung, die wir in der Nase fühlen, nicht von einer Reizung des Riechnerven her, sondern von der des Trigeminus, obwol der Riechnerv auch in starke Erregung versetzt wird.

Bei Gasen machen wir die Bemerkung, dass die riechbaren solche sind, welche grössere Neigung haben chemische Verbindungen einzugehen, und auch auf organische Gewebe schnell verändernd einwirken. Dazu gehört Schwefelwasserstoffgas, welches das Blut schwarz färbt und zersetzt, ferner Chlor, Jod und Brom, welche die organische Substanz schnell zerstören, und ebenso Ammoniak. Dazu gehören ferner die Dämpfe von Alkohol, Aether, Chloroform, die alle schnell verändernd auf thierische Gewebe wirken.

Die nicht riechbaren Gase dagegen bringen alle gar keine oder sehr langsam eintretende chemische Veränderungen in thierischen Geweben hervor. Dazu gehört der Stickstoff, der ganz indifferent ist, ebenso Wasserstoff, ferner die Kohlensäure, die keine Zersetzung veranlassen kann. Auch das geruchlose Kohlenoxydgas, obwol es sehr giftig ist, zerstört nicht die wesentlichen Bestandtheile des Blutes, da es aus diesem wieder ausgetrieben werden kann, ohne dass das Blut seine wesentliche Eigenschaft verloren hätte. Auch der Sauerstoff wirkt nicht schnell auf thierisches Gewebe ein und verhält sich daher, abgesehen von der langsamen

Oxydation, indifferent. Nur in dem activen Zustande dessselben, den man Ozon genannt hat, besitzt er auch bei gewöhnlicher Temperatur eine stärkere Affinität, und es scheint daher beachtenswerth, dass er in diesem Zustande auch einen eigenthümlichen Geruch besitzt.

Ausser wohlriechenden Substanzen und den entschieden unangenehm und übelriechenden, gibt es nun eine Unzahl von riechbaren Substanzen, die sich in keine Kategorien bringen lassen. Chemisch werden sich dieselben ordnen lassen, wenn man sie alle ihrer Zusammensetzung nach genau kennen wird. Aber die Geruchsempfindungen, welche sie erzeugen, sind alle specifisch verschieden, und sehr charakteristisch für jede einzelne Substanz. Wir erkennen eine grosse Zahl von Speisen, die wir geniessen, sehr gut durch den Geruch, der uns angenehm dünkt, wenn wir hungrig sind, aber auch unangenehm, selbst ekelerregend sein kann, wenn wir satt sind.

Bisjetzt hat die Wissenschaft noch keinen Anhalt dafür, wie das Zustandekommen der verschiedenartigen Geruchsempfindungen zu erklären sei, welcher Unterschied der Erregung zwischen angenehmen und unangenehmen Geruchswahrnehmungen stattfinde. Nach Analogie der Qualitäten der Lichtempfindung sollte man meinen, dass auch im Riechnerven verschiedenartige Endorgane vorhanden seien, welche den mit ihnen verbundenen Nervenfasern verschiedene Geruchsqualitäten übermitteln. Doch wieviel solcher Nervengattungen sollen wir annehmen, da wir nicht einmal im Stande sind, alle Geruchsempfindungen in bestimmte Qualitäten einzureihen, und uns ihre Zahl unendlich gross zu sein scheint? Die Beantwortung solcher Fragen müssen wir auf diesem noch sehr dunkeln Gebiete der zukünftigen Forschung überlassen.

---

## Zweites Kapitel.

### Der Geschmackssinn.

Obwol der Geschmack ein dem leiblichen Wohl des Menschen äusserst nothwendiger Sinn ist, so hat die Wissenschaft doch noch wenig Sicheres über sein Wesen zu ergründen vermocht. Selbst seine Ausbreitung in der Mundhöhle ist noch nicht mit übereinstimmender Sicherheit festgestellt. Dass die Zunge der wichtigste Träger der Geschmacksorgane ist, ist unbestreitbar, ebenso dass sie ganz hinten an ihrer Wurzel die intensivste Geschmacksempfindung besitzt. Auch dass die Zungenspitze allein zu schmecken vermag, davon hat sich wol schon jeder aus Erfahrung überzeugt. Wie es aber mit den übrigen Abschnitten der Zungenoberfläche bestellt ist, darin weichen die Angaben der Untersucher auseinander. Der Zungenrücken scheint nach den meisten Beobachtern gar keine oder nur sehr stumpfe Geschmacksempfindungen zu haben, während sich dieselbe bei den meisten an den Zungenrändern wieder einstellt. Die Beobachtungen hierüber sind deshalb schwierig und unsicher, weil die Substanzen, welche man auf die Zunge bringt, nicht gut an einzelnen Stellen isolirt haften bleiben, sondern sich sehr leicht weiter ausbreiten, und da Spuren davon genügen, um sich bemerkbar zu machen, so ist man vielen Täuschungen ausgesetzt.

Noch zweifelhafter sind daher die Angaben über die Geschmacksempfindlichkeit des Gaumens, obwol im gewöhnlichen Sprachgebrauch der Gaumen als ein grosser Feinschmecker angesehen wird. Manche Beobachter geben an, dass der ganze weiche Gaumen, auch dessen Zäpfchen, eine Geschmacksempfindung habe, doch ist von andern sorgfältigen Beobachtern bemerkt worden, dass jede Empfindung ausbleibt, wenn man die Substanzen

mit einem Pinselchen isolirt aufträgt, und jede Berührung mit der Zungenwurzel vermeidet. Möglich ist es, dass hierin individuelle Verschiedenheiten stattfinden, sodass bei dem einen oder dem andern die Empfindlichkeit sich mehr oder weniger weit erstreckt. Kurzum es scheint sich hier der alte Satz zu bewähren: *De gustibus non est disputandum.*

Einen bessern Anhalt bietet die anatomische und mikroskopische Untersuchung der Geschmacksorgane. Die ganze Zungenoberfläche ist mit kleinen Wärzchen, den Geschmackspapillen, besetzt, welche dem blossen Auge sichtbar sind. Einige von ihnen tragen auf ihrem Ende einen Büschel von Fäden, andere sind breit und höckerig an ihrer Oberfläche. An der Zungenwurzel zeichnet sich aber eine im Halbkreise stehende Zahl von grössern Papillen aus, welche von einem ringförmigen Walle umgeben sind. An diesen wallförmigen Papillen hat man nun kleine Vertiefungen gefunden, welchen man den Namen Schmeckbecher gegeben hat. Dieselben liegen vorzüglich in der durch den Wall gebildeten Rinne, sind innen mit länglichen Zellen ausgefüllt, welche durch Ausläufer mit feinen Nervenfasern in Verbindung stehen. Aehnliche Organe sind auch an den übrigen Papillen der Zungenschleimhaut gesehen worden, und es ist sehr wahrscheinlich, dass wir in ihnen die eigentlichen Geschmackswerkzeuge zu suchen haben.

Gibt es einen besondern Geschmacksnerven? — Auch diese Frage lässt sich nicht so glatt beantworten, als es bei den andern Sinnen entsprechend der Fall war. Allerdings gibt es einen Nerven, der Zungen-Schlundkopfnerv, welcher ganz unbestreitbar als der wichtigste Geschmacksnerv zu betrachten ist, aber es mischen sich in ihm die Geschmacksfasern mit einer Anzahl motorischer Nerven für den Schlundkopf, während Seh-, Hör- und Riechnerv sich von jeder fremdartigen Beimischung freihalten. An Thieren hat man diesen Nerven an beiden Seiten des Kopfes durch-

schnitten und hat beobachtet, dass sie nach dieser Operation Speisen verschlingen, die mit den bittersten Substanzen vermengt waren, während diese von gesunden Thieren zurückgewiesen wurden.

Ausser dem genannten Nerven geht zur Zunge aber noch ein sensibler Nerv, der Zungennerv, welcher die Zunge mit Tastgefühl und Empfindlichkeit ausstattet. Von diesem ist es noch streitig, ob er neben den gewöhnlichen sensibeln Fasern auch noch Geschmacksfasern enthält. Jedenfalls kann er von schmeckenden Substanzen miterregt werden, wenn diese scharfe ätzende Eigenschaften besitzen, wie starke Säuren, Alkalien, scharfe Gewürze u. s. w.

Unter den Qualitäten der Geschmacksempfindungen erscheinen uns der süsse und der bittere als ganz reine Sinneseindrücke, ohne Beimischung einer anderweitigen Reizung sensibler Nerven. Eine noch so starke Concentration dieser Empfindungen wird sich niemals bis zur Schmerzhaftigkeit steigern, während der sauere Geschmack, wenn er sich steigert, ein zusammenziehendes, schmerzhaft-brennendes Gefühl verursacht. Zueinander verhalten sich beide als Gegensätze, da der süsseGeschmack uns als der angenehme, der bittere als der unangenehme Sinneseindruck erscheint. Die Süssigkeit des Zuckers in der Milch bietet neben dem Hunger für den Säugling einen nicht zu unterschätzenden Reiz, welcher zur Nahrungsaufnahme anlockt. Der bittere und der sauere Geschmack dagegen, den wir bis zu einem gewissen Grade in unserer Nahrung zulassen, wird von dem viel empfindlichern Geschmacksorgane des Säuglings entschieden als unangenehme Empfindung zurückgewiesen.

Auch insofern bildet der süsse Geschmack gegen den bittern und sauern einen Gegensatz, als wir im Stande sind, die Unannehmlichkeit der beiden letztern durch den erstern zu mässigen, indem wir vielen bitter und sauer schmeckenden Speisen Zucker beimischen. Da wir hierdurch den Geschmack gleichsam corrigiren,

ohne dass eine chemische Einwirkung des Zuckers auf die bittern und sauern Substanzen stattfindet, so müssen wir annehmen, dass hier eine Art Interferenz der Empfindungen vorhanden sei, für die wir freilich noch gar keine Erklärung besitzen. Es kann sich auch der süsse Geschmack mit dem bittern und sauern zu einem angenehmen Geschmacksaccord vereinigen. Was dagegen den salzigen Geschmack anbetrifft, so werden es viele aus Erfahrung bestätigen, dass er durch Zusatz von Zucker nicht gemildert wird, und dass sich beide auch nicht zu einer angenehmen Geschmacksempfindung combiniren.

Der Gegensatz zwischen dem süssen Geschmacke und den übrigen zeigt sich auch in folgenden Erscheinungen. Wenn wir etwas Bitteres oder Salziges gekostet haben, so schmeckt uns unmittelbar danach reines Wasser süsslich, und zuweilen haben wir nach Genuss von vielem Zucker einen säuerlichen Geschmack im Munde. Es liegt sehr nahe, hier an einen ähnlichen Vorgang zu denken, wie er bei den Contrastfarben stattfindet, aber es fehlt uns bisjetzt jeder Anhalt, einen solchen Vergleich durchzuführen.

Worauf beruht überhaupt der Unterschied beim Empfinden der verschiedenen Geschmackserregungen? Diese Frage müsste zunächst beantwortet werden, aber leider lässt sich nichts mit Bestimmtheit darüber aussagen. Wol wäre es möglich, dass mehrere Nervengattungen mit verschiedenen Endorganen existirten, von denen die einen den süssen, die andern den bittern, andere den sauern Geschmack erzeugten. Doch ist die Wissenschaft noch nicht im Stande, diese Ansicht durch irgendwelche Versuche und Beobachtungen genügend zu stützen.

Noch viel weniger lässt sich darüber etwas aussagen, weshalb die eine Substanz süss, die andere bitter schmeckt. Wenigstens gibt uns die chemische Zusammensetzung keinen Anhaltspunkt zur Erklärung ab, denn sehr verschiedenartig zusammengesetzte Substanzen

besitzen einen gleichartigen Geschmack. Ausser dem Zucker, der aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff besteht, besitzt auch das essigsauere Bleisalz einen süssen Geschmack; einen bittern Geschmack aber besitzen sehr viele Substanzen, wie Chinin, schwefelsauere Magnesia und andere, deren Zusammensetzungen sehr voneinander abweichen und nichts Gemeinsames in ihren chemischen Charakteren haben.

Eine bessere Uebereinstimmung zwischen Geschmack und chemischen Charakteren zeigt sich bei den Säuren und Alkalien. In der Chemie hat man eine Reihe von Verbindungen, welche sich durch einen saueren Geschmack auszeichnen, als Säuren bezeichnet. Zugleich haben diese die Eigenschaft, gewisse Farbstoffe zu ändern, z. B. blaues Lakmus roth zu färben. Den Gegensatz zu ihnen bilden die Basen, von denen die löslichen, die Alkalien, einen eigenthümlichen Geschmack besitzen, auch wie die Säuren ätzend einwirken, und geröthetes Lakmus wieder blau färben. Bei der Verbindung der Säuren und Basen zu Salzen heben sich ihre charakteristischen Eigenschaften gegenseitig auf, und sie verlieren dabei auch den eigenthümlichen Geschmack, während sich ein anderer Geschmack, entweder ein salziger wie beim Kochsalz, oder ein bitterer wie bei der schwefelsauren Magnesia, oder gar ein süsser wie beim essigsauren Blei einstellt.

Der saure, der alkalische und der salzige Geschmack haften im grossen und ganzen drei Reihen von Verbindungen an, die auch durch bestimmte chemische Charaktere sich voneinander abgrenzen, sodass man nicht ohne Grund ihren Geschmack mit ihren chemischen Eigenschaften in Verbindung bringen darf. Freilich muss man hinzufügen, dass ebenso wenig die chemischen wie die Geschmackseigenschaften dieser Verbindungen durch ganz scharfe Grenzen getrennt sind.

Sehr merkwürdig ist es, dass man durch den elektrischen Strom den sauren und den alkalischen Geschmack künstlich hervorrufen kann. Wenn man einen

Strom durch die Zunge leitet und den positiven Pol an die Zungenspitze anlegt, den negativen Pol an den Nacken, sodass der Strom von der Spitze zur Zungenwurzel geht, so empfindet man an der Zungenspitze einen deutlich sauren Geschmack, liegt aber der negative Pol der Zunge an, so empfindet man einen andern Geschmack, welchen die meisten als laugenartig, also alkalisch, bezeichnen. Nun weiss man, dass der elektrische Strom die Salze zerlegt, und dass sich am positiven Pol die Säure, am negativen Pol das Alkali absetzt, und da sich in der Mundflüssigkeit auch Salze befinden, so könnte man meinen, dass sich am aufgelegten Pole Säuren und Alkalien abscheiden, welche wir durch den Geschmack wahrnehmen. Doch dem ist nicht so; denn wenn wir die Metallpole gar nicht mit der Zunge in Berührung bringen, sondern Flüssigkeiten oder die Lippen selbst dazwischen schieben, so empfinden wir den elektrischen Geschmack ebenfalls. Nun wäre es immerhin noch möglich, dass im Gewebe der Zunge selbst Zersetzungen stattfinden, welche den Geschmack erzeugten, doch wissen wir über derartige Vorgänge so wenig, dass sich darauf eine befriedigende Erklärung noch nicht aufbauen lässt.

Schon schwache Ströme sind im Stande, den Geschmack zu erzeugen, und die einfachste Art ihn hervorzurufen besteht darin, ein blankgeputztes Zink- und Kupferstückchen so auf die Zunge aufzusetzen, dass das eine mit seinem Rande die Zungenspitze, das andere den Zungenrücken berührt. Bringt man nun die obern Ränder derselben in Berührung, so empfindet man einen deutlichen Geschmack, welcher sauer ist, wenn sich Zink unten, alkalisch, wenn sich Kupfer an der Spitze befindet. Die feuchte Zunge bildet hier mit den beiden Metallen ein schwaches galvanisches Element.

Die Empfindlichkeit unseres Geschmacksorganes für gewisse Substanzen ist eine ziemlich bedeutende, doch vermag sie die des Geruchs nicht zu erreichen. Wir

vermögen eine Lösung von Schwefelsäure in Wasser von ungefähr 0,1 Procent noch allenfalls durch den Geschmack zu erkennen. Bringen wir davon einen Tropfen auf die Zunge, so ist darin ungefähr $^1/_{2000}$ Gramm Schwefelsäure enthalten, eine immerhin sehr kleine Menge, deren Nachweis der chemischen Analyse schon Schwierigkeiten bereiten würde.

Im gewöhnlichen Leben spricht man, ausser von den genannten Geschmacksqualitäten, noch von manchen andern, wie faulig, ranzig, ölig, aromatisch u. dgl. Zur Beurtheilung solcher Bezeichnungen müssen wir aber bedenken, dass sich sehr häufig zu den reinen Geschmacksempfindungen erstens Geruchsempfindungen hinzugesellen und zweitens Tastempfindung der Zunge und des Gaumens. Die erstern entstehen dadurch, dass Dämpfe der genossenen Speisen durch die Rachenhöhle in die Nasenhöhle hineinsteigen, die letztern werden durch die Form und den Cohäsionszustand der Speisen erzeugt. Der Geschmack des Weines, seine Blume, wird zum grossen Theil durch den Geruch einiger Aetherarten bestimmt. Die Kartoffel hat gewiss an sich keinen Geschmack, und doch glauben wir, dass sie in verschiedener Form verschieden schmeckt. Offenbar combinirt sich in allen solchen Fällen Geruch, Geschmack und Gefühl zu einer gemeinsamen Empfindung.

---

# Sachregister.

